

 系统科学与
系统管理丛书

An Introduction to
S*ystems Science*

系统科学导论

——复杂性探索

颜泽贤 范冬萍 张华夏 著

 人民出版社

托马斯·库恩(Thomas S. Kuhn)曾一再强调一本好的教科书对于表达一门科学的范式的重要性。他说:“一种新理论总是同它的应用一起进入教科书,未来的工作者即由此而学到他们的专业。这个过程一直贯穿到从大学一年级到通过博士论文。”“有了一本教科书,科学工作者就可以从教科书达不到的地方开始研究,从而可以高度集中到科学界所关心的最微妙、最深奥的自然现象中去。”我认为,这本系统科学教材能起到这种作用。它概括了系统科学迄今为止的成果,表达了系统科学的范式,将推动系统科学的发展。

——中国社会科学院 金吾伦教授

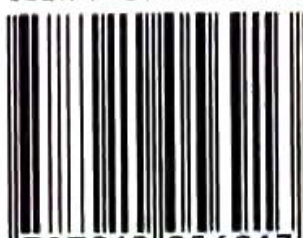
本书在综合吸收国际上复杂性研究各学派最新成果方面反应敏捷,在国内学术界第一次给出了复杂性系统科学研究的一个相当完整的理论化表述。我特别欣赏的是,本书中蕴涵着对复杂性辩证法的精彩描述:尽管系统演化在整体上不可精确预测,然而在模拟叠代意义上却可预测、可推导,而且突现生成过程甚至在计算机模拟实验中还可观察,这是对不可知论的现代翻版的有力反驳。本书还从科学上阐明了“上向因果”与“下向因果”以及“上索”与“下索”双向互动的机制,从而显示出活生生的自然辩证法。

——武汉大学 桂起权教授

这是我所见到的关于“系统科学”的国内教材中既精练又完整、既系统又前沿的最好教材之一。教材内容精当,观点突出,逻辑清楚,五篇十二章,既洋洋洒洒、讨论全面,又叙述得体、通俗易懂。这部著作是在我熟悉的这老中青三位作者的完美配合、密切合作及其激烈争论与交流中完成的,它同时也书写了科学研究的合作佳例。

——清华大学 吴彤教授

ISBN 7-01-005691-9



9 787010 056913 >

ISBN 7-01-005691-9

定价: 49.00元



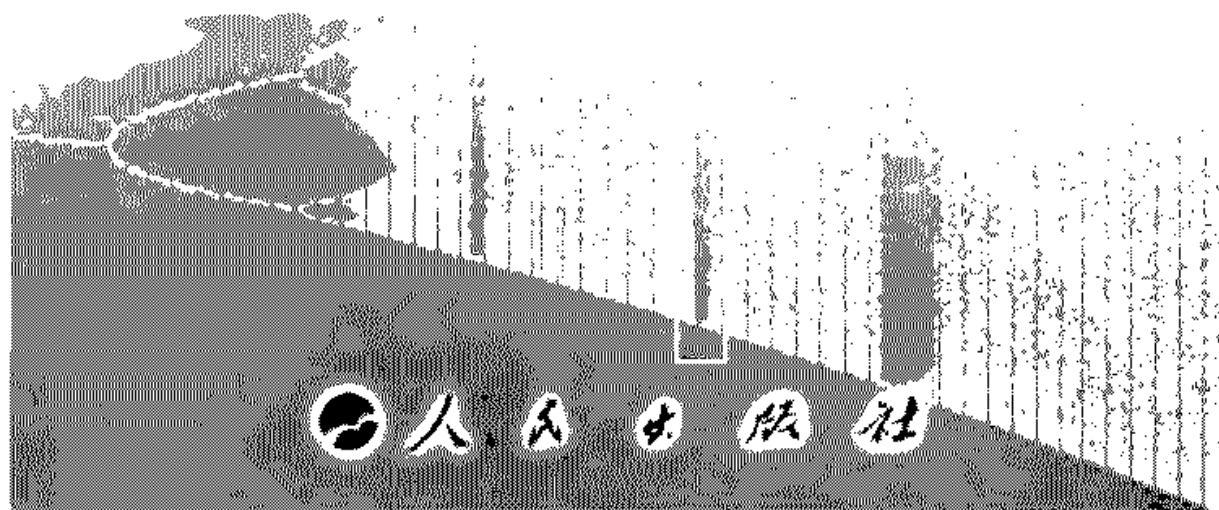
系统科学与
系统管理丛书

*An Introduction to
Systems Science*

系统科学导论

——复杂性探索

颜泽贤 范冬萍 张华夏 著



人

民

大

学

社

责任编辑:喻 阳

文字编辑:田土章

封面设计:肖 辉

版式设计:顾杰珍

图书在版编目(CIP)数据

系统科学导论——复杂性探索/颜泽贤、范冬萍、张华夏著.

—北京:人民出版社,2006.9

(系统科学与系统管理丛书/颜泽贤主编)

ISBN 7-01-005691-9

I. 系… II. ①颜…②范…③张… III. 系统科学
IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 075066 号

系统科学导论

XITONG KEXUE DAOLUN

——复杂性探索

颜泽贤 范冬萍 张华夏 著

人民出版社 出版发行

(100706 北京朝阳门内大街 166 号)

北京瑞古冠中印刷厂印刷 新华书店经销

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

开本:710 毫米×1000 毫米 1/16 印张:31.75

字数:491 千字 印数:0.001—3,500 册

ISBN 7-01-005691-9 定价:49.00 元

邮购地址 100706 北京朝阳门内大街 166 号

人民东方图书销售中心 电话 (010)65250042 65289539



作者简介

颜泽贤，现任广东省社会科学界联合会主席，华南师范大学教授、博士生导师，中国复杂性与系统科学哲学研究会理事长，广东省科协副主席，广东省自然辩证法研究会会长等；曾任原苏联基辅大学高级访问学者、华南师范大学校长。主要研究领域：系统科学与系统管理。主要代表作有：《复杂系统演化论》（人民出版社）、《现代系统理论》（香港三联书店）、《耗散结构与系统演化》（福建人民出版社）等。

范冬萍，华南师范大学公共管理学院副院长；科学技术哲学博士、教授；全国复杂性与系统科学哲学研究会副秘书长；中华全国青年联合会第十届委员会委员。主要研究领域：系统科学哲学与系统管理；科技伦理。

张华夏，中山大学哲学系教授，华南师范大学公共管理学院客座教授。曾任英国阿伯丁大学研究员。现任中国系统科学研究会副会长。已出版著作有：《物质系统论》（1987）、《系统工程方法与管理战略决策》（1996）、《系统观念与哲学探索》（2004）、《现代科学与伦理世界》（1999）。



系统科学与系统管理丛书

● 《系统科学导论——复杂性探索》

顾泽贤 范冬萍 张华夏 著

○ 《复杂系统管理研究——管理理念的变革》

顾泽贤 著

○ 《复杂系统突现论——复杂性科学与哲学的视野》

范冬萍 著

○ 《社会可持续发展的系统进路与对策研究》

顾泽贤等 著

○ 《道德哲学与经济系统分析》

张华夏 著

总 序

我们正生活在一个大转变的年代。这一转变的重要标志是人与社会、人与自然之间展开了一场新的对话。这场对话的内容之一是系统科学的产生和复杂性探索的兴起。

20 世纪 40 年代以来,以系统科学和复杂性探索为主要代表的新兴学科的产生,标志着人类科学研究又进入了一个新的历史时期,科学发展正经历着一场历史性转变。和以往几次重大科学革命一样,这次科学变革也将改变世界的科学图景,革新传统的科学认识和方法,引起科学思维方式的重大变革。

系统科学和复杂性探索相生相伴、共同发展,成为当今世界科学发展的前沿和热点,甚至被称为“21 世纪的科学”。这一领域的研究目前已是硕果累累,一片繁荣。各种系统理论不断发展成熟,新的复杂性探索正在逐步深化。在这群雄并起、学派纷争的系统复杂性探索中,我们认为,其研究进路大致在四个层面展开:第一,在各门具体科学层面或特定领域中的系统复杂性研究,这既是各门具体科学研究的重大课题,也是系统复杂性研究的重要阵地。第二,以跨学科、交叉性的研究进路,探讨不同复杂系统之间的共性,建构系统复杂性突现和演化的一般性理论和思维范式。这不仅是系统复杂性研究的核心目标和宗旨,而且也代表了整个科学发展的一个重要趋势。第三,从哲学的层面对系统复杂性的一般理论进行提升和抽象,以期建构一个相对形而上的概念体系和逻辑框架,为认识客观世界提供一种新的视角。由此,系统科学的哲学研究是科学哲学的一个具有挑战性的新课题。第四,将系统复杂性理论和方法应用于解决现实的复杂问题,特别是组织管理系统问题,是系统复杂性研究的一个重要领域和进路。系统复杂性与系统管理相交叉的综合研究,不仅会为管理

科学带来范式性的变革,而且也为系统复杂性研究提供了独特的发展资源。

事实表明,系统复杂性研究乃是一个生机勃勃、纷繁复杂、充满挑战和机遇的领域。有人认为,正如伽利略为牛顿建立简单系统理论铺平了道路一样,目前,建立复杂系统理论的研究纲领和统一范式正处于一个需要“牛顿”出现的“伽利略”时代。因此,我们要在这个领域开展有效的研究,逐步形成一个具有相对共识的研究纲领,就需要“立足本土、紧盯前沿,海纳百川、继承创新,扎扎实实、默默耕耘”,用系统复杂性方法来指导系统复杂性研究。我们以为,首先,要切实追踪和把握系统科学和复杂性探索的前沿和趋势,系统搜索和重点研读国内外相关理论著作,特别是得到国际学界认可的重要著作和教材,并对其中某些学科、学派的观点进行深入研究和推介。其次,在这一基础上力图按上述四个层面的进路,包括系统思想、系统理论、系统方法、系统哲学、系统应用等,展开扎扎实实的研究,特别要把构建一个与当代这一领域研究成果相适应的、有我们自己特色的关于系统科学和复杂性的理论框架及其应用作为奋斗目标。其三,加强与国际国内学术界同行的合作与交流,加强学术对接与对话,逐步形成具有共识的研究纲领和统一范式,进而形成这一领域的研究共同体和“学派”。人们期待并相信,复杂系统理论的“牛顿”终将会出现。

为了反映近年来我们这一小小的研究共同体在这一领域耕耘的成果,我们组织编辑了《系统科学与系统管理丛书》。首批将出版五本专著。这批著作以系统科学和复杂性探索前沿理论研究为核心,既有推介国外有影响的系统复杂性研究的翻译著作,也有我们自己的研究成果和心得;既有适用于高等学校的系统科学教材,也有我们对系统复杂性的理论和应用进行研究的学术性专著;既有复杂性探索的基础理论,也有复杂性方法的应用研究。无论是哪个层面的研究成果,我们都要求它们既坚持理论性和学术性,又顾及普及性和读者群;既具有国际性和前瞻性,又保持特色性和创新性。我们打算以此《丛书》建构自身的生长基点,探求进一步的发展形式;我们也期望本《丛书》是一个开放的学术平台,能得到国内同行的关注与支持。坚持下去,渐成规模,形成特色,产生效应,为中国的系统科学研究和复杂性探索贡献绵薄之力!

感谢研究共同体中的学长、同仁及我的学生们的积极参与！
感谢人民出版社的鼎力支持！

顏 澤 賢

2004 年 6 月于羊城

前 言

托马斯·库恩(Thomas S. Kuhn)曾经一再强调一本教科书对于表达一门科学的范式的重要性。他说:“一种新理论总是同它在某一具体自然现象领域的应用一起产生的;离开应用,理论不会被人们接受。被接受以后,这种相关应用就随着理论一起进入教科书,未来的工作者即由此而学到他们的专业。……这个过程一直贯穿到从大学一年级到通过博士论文。”^①另一方面,“有了一本教科书,科学工作者就可以从教科书达不到的地方开始研究,从而可以高度集中到科学界所关心的最微妙、最深奥的自然现象中去。”^②现在系统科学已被公认为是一种科学的新范式。因此,一本好的系统科学教材,对于概括系统科学的成果、表达系统科学的范式、推动系统科学的发展至关重要。

本书的三位作者,虽来自不同的工作单位(张华夏为中山大学教授,颜泽贤和范冬萍为华南师范大学教授),有着不同的专业背景(颜泽贤原所学专业是物理学,张华夏原所学专业是经济学,范冬萍原所学专业是生物学),但后来以读研究生、出国进修等“选择”与“被选择”,都拢到了科学技术哲学这个“大口袋”里,虽被看做是“搞专业半途而废,搞哲学半路出家”的一类,但又造成了我们进行跨学科研究的有利条件。正是“系统科学”,使我们结下了不解之缘,形成了一个小小的“共同体”。从20世纪80年代起,我们在中国的系统运动中,也开始被运动。颜泽贤1987年著有《耗散结构与系统演化》(福建人民出版社),1991年主编《教育系统论》(河南教育出版社),1993年发表《现代系统理论》(三联书店(香港)有限公司),同年

① Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press, 1962, p. 46.

② *ibid.*, p. 20.

出版《复杂系统演化论》(人民出版社)等。张华夏 1987 年著有《物质系统论》(浙江人民出版社),1997 年编有《系统工程方法与管理战略决策》(中国和平出版社),2003 年著有《系统观念与哲学探索》(中山大学出版社)等。范冬萍 2001 年运用系统思想写作了《生命天书的挑战——人类基因组计划的伦理思考》(香港二十一世纪,第 63 期),2003 年主编了《基因与伦理——来自人类自身的挑战》一书(羊城晚报出版社),并在该书中撰写了“人类基因组计划的整体论思维”等章节。她的博士学位论文《复杂系统突现的动力学机理》,收集、整理和评价了大量有关复杂系统科学的国外最新文献。可以说,20 多年来我们持续地对系统科学进行了学习与研究。

进入 21 世纪,基于上述库恩思想的启发和教学科研的需求,小小“共同体”产生了一个阶段性的工作目标——编写一本系统科学的教科书。于是从 2001 年开始,我们便在国内和国外普查和寻找最新的系统科学教科书。我们发现全世界许多系统科学系、管理科学系,甚至计算机科学系都正在编写系统科学教科书。于是,上十本教科书陆续地摆在我们的面前,我们从英国选择了一本,又从美国选择了一本作为教材在硕士生和博士生中进行讲授,可是效果并不令人满意,可能是因为不太适合中国学生的知识背景和学术传统的缘故。于是我们便力图以博取各家之长、融会贯通、建自己体系的工作思路,编写一本适合中国读者的系统科学导论。

我们首先反复讨论写作大纲,这些大纲详细到每一小节需要写一些什么内容,以防止分工写作后发生重复或脱节。这个写作大纲便是我们合作的社会契约。因为我们非常明白,当集体编写一本教材时,每个人都有一个脑,不存在一个集体的脑。只有不断地协调才能使得编写的成果前后逻辑一贯,结构严整。

在本书编写过程中,作为讨论的共识和成果,我们合作写过一系列论文。包括颜泽贤、张华夏:《进化的系统哲学和我们的研究纲领》;(《自然辩证法研究》2003 年第 9 期);范冬萍:《系统哲学的新探索》(同上);范冬萍、张华夏:《复杂系统的目的性与深层生态伦理》(《学术研究》2003 年第 3 期);张华夏、颜泽贤、范冬萍:《价值系统控制论》(《广东社会科学》2003 年第 4 期);颜泽贤、范冬萍:《复杂性探索:理论与价值》(载《新世纪,新思维》,中国财政经济出版社 2004 年版);范冬萍、张华夏:《突现理论:历史与前沿——复杂性科学与哲学的考察》,(《自然辩证法研究》2005 年第 6

期);张华夏、颜泽贤、范冬萍:《系统科学研究社会合作的几种进路》(2005年第九届全国系统科学学术研讨会论文);范冬萍、张华夏:《系统分类的新视野》(《自然辩证法通讯》2005年第6期);张华夏、范冬萍等合译威廉·鲍威尔的《感知控制论》(广东高教出版社2004年版);张华夏、颜泽贤、范冬萍:《感知控制论》(2004年哲学与认知科学国际研讨会文集);张华夏、颜泽贤、范冬萍:“Some Axiological Interpretations of PCT”(美国控制论系统研究会2003年洛杉矶国际会议论文);张华夏:“PCT in China”和范冬萍、颜泽贤:“The Cybernetics Of Value Systems”(美国控制论系统研究会2004年芝加哥国际会议论文)。特别是2005年我们在《哲学研究》科学哲学栏中发表了一组论文:颜泽贤的《突现问题研究的一种新进路——从动力学机制看》,范冬萍的《论突现性质的下向因果关系——回应 Jaewon Kim 对下向因果关系的反驳》,张华夏的《兼容与超越还原论的研究纲领——理清近年来有关还原论的哲学争论》(均见《哲学研究》2005年第7期)。以上这些论文从一个侧面表现了我们三人进行复杂性和系统科学及其哲学问题研究的合作状况。这本教材进一步拓展了我们的合作研究。对于本书,我们三人的贡献是同样的,三人中的任何一个人,没有其他二人的帮助都是不可能写出这本书的。我们之间在写作本书过程中经过了无数次的讨论,每次讨论无论是取得了一致的意见,还是进行了必要的妥协,都是对问题的一种较好的解决,或者是提出了新的问题。由此自己修改或互相修改稿子,以至于我们没有可能和必要指出那一章那一节是由谁或者按谁的意见执笔写成的。在此,我们三人只能互相表示感谢。

本书在编写过程中,除参考了半个世纪以来系统科学最基本的文献外(这些文献我们大多数看过,也有一部分尚未看完),我们还着重参考了下列一些最新教科书和电子教材:^①G. 克勒尔(G. J. Klir)的《系统科学面面观》第二版(2001);现任国际系统科学学会会长、英国霍尔大学管理系统专业教授 M. 杰克逊(Michael C. Jackson)的《系统思考》(2003)和《管理的系

① 关于系统科学的基本文献,海里津(F. Heylighen)、图琴(V. Turchin)和约翰逊(A. Joslyn)的网站 Principia Cybernetica 开了一个精选的清单。克勒尔(G. J. Klir)在《系统科学面面观》一书第二部分选编了37篇重要论文。英国霍尔大学米德格里(Gerald Midgley of University of Hull)主持的国际编委会于2003年编辑了四卷本《系统思维》,收集了包括波格丹诺夫著作在内的系统科学基本著作选读共1664页。

统进路》(2000);英国系统科学家福罗特(Robert L. Flood)教授与英国城市大学系统科学教授卡逊(Ewart R. Carson)合著的《处理复杂性——系统科学理论与应用引论》第二版(1993);美国雅虎研究实验室创始人、微软公司计算机专家和圣菲访问研究员弗拉克(Gary William Flake)博士编写的《自然界的计算美:分形、混沌、复杂系统和适应性探索》第四版(2001);瑞士卢塞大学克里格(David J. Krieger)博士等人编写的电子教材《系统科学引论》(2005);英国曼彻斯特计算机专家卢卡锡(Chris Lucas)等人编写的电子教材《自组织系统的复杂性与人工生命研究》(2005);琼斯(J. D. Jones)编写的《混沌——计算机运行教材》(2003)以及海里津、图琴和约翰逊主编的《控制论原理》(Principia Cybernetica)网站的研究纲领(2005)^①。本教材在写作过程中广泛地参考和引用了这些教材和网页。这种引用,除了在本书正文中做了注明之外,在此特向这些文献的作者表示感谢。

本书初稿完成后,武汉大学桂起权教授通读了全书并提出许多宝贵意见。中国社会科学院金吾伦教授、朱葆伟教授、清华大学吴彤教授、中山大学张志林教授以及华南师大陈晓平教授阅读了本书某些部分或参加了本书写作过程的讨论,他们都提出了很好的意见。在此特向他们表示衷心的感谢。

张立洪讲师和张本祥研究员参加了本书前期的编写工作,并对写作提出了许多宝贵意见,我们表示衷心感谢。闫旭辉老师,王东、马步广等博士生以及张珍等硕士生翻译了部分英文文献,加快了我們了解和理解相关文献的速度,我们一并表示感谢。

最后,感谢人民出版社的鼎力支持!

① 以上文献的英文原名及出处,参见本教材后面的参考文献

目 录

前 言	001
-----------	-----

第一篇 导 论

第1章 绪 论	003
1.1 系统科学的研究对象、特点和体系	003
1.2 系统科学的意义和地位	009
1.3 本书的建构理念与体系结构	013
第2章 系统运动	020
2.1 历史上的系统观念和系统思想	020
2.2 系统运动的根源	025
2.3 系统科学的发展	033
2.4 复杂系统科学研究的流派、进路与展望	054

第二篇 一般系统论

第3章 系统概念	069
3.1 系统及其元素与结构	069
3.2 系统的环境与功能	077
3.3 系统的状态和状态的变化	083
3.4 系统的稳定性	091
第4章 系统思想	097
4.1 突现与整体性原理	097
4.2 系统的等级层次结构	110
4.3 通讯与信息	119

4.4	控制与调节	128
4.5	进化与自组织	138
第5章	系统方法	151
5.1	系统科学与跨学科研究方法	151
5.2	还原与上索,层次分析与综合	157
5.3	功能分析与黑箱方法	165
5.4	隐喻、类比与模型	180

第三编 复杂系统总论

第6章	系统复杂性	199
6.1	复杂性的概念	199
6.2	复杂性的基本特征	202
6.3	复杂性的度量:描述的复杂性和计算复杂性	209
6.4	布莱曼计算极限	215
6.5	复杂性形成的离散动力学分析	217
6.6	结构功能的复杂性及其增长	231
第7章	混沌与动力系统	240
7.1	叠代与吸引子	242
7.2	相控图、分叉与层叠	250
7.3	分形	258
7.4	动力系统与混沌吸引子	273

第四编 复杂系统分论

第8章	系统进化控制论	291
8.1	控制与元系统跃迁	293
8.2	进化的阶梯与倒数第二层分叉增长规律	298
8.3	感知控制的概念	307
8.4	人类认知的 11 个层次	312
8.5	应用	320

第9章 系统自组织理论	331
9.1 自组织的概念和经典案例	331
9.2 自组织的条件与机制:远离平衡态开放系统中的非线性 相关	341
9.3 涨落、分叉与协同作用	348
9.4 自主行动主体之间的自组织	361
第10章 复杂适应系统理论	370
10.1 适应性的概念	370
10.2 适应性行动主体	377
10.3 模拟适应性行动主体建模功能的分类系统	380
10.4 遗传算法	389
10.5 复杂系统的适应性受约束生成过程	398
 第五编 复杂系统管理理论	
第11章 复杂系统管理思想	405
11.1 当代组织管理理论中的系统思想	406
11.2 活系统模型及其组织控制观	414
11.3 复杂性与管理	430
第12章 复杂系统管理方法	436
12.1 硬系统方法	437
12.2 软系统方法的理论与实践	445
12.3 批判的系统思想方法	451
 后 语	459
参考文献	466
索 引	480



Contents

Foreword	001
----------------	-----

Part One Introduction

Chapter I Prelude	003
I. 1 The Object, Properties and Frame of Systems Science	003
I. 2 The Significance and Status of Systems Science	009
I. 3 The Guiding Principle and Structure of the Book	013
Chapter II System Movement	020
II. 1 System Concepts and Systems Thinking in History	020
II. 2 The Source of System Movement	025
II. 3 The Development of Systems Science	033
II. 4 Schools, Approaches and the Future of Complex Systems Science	054

Part Two General System Theory

Chapter III System Concepts	069
III. 1 System, its Elements and Structure	069
III. 2 The Environment and Function of Systems	077
III. 3 States of Systems and Their Variation	083
III. 4 The Stability of Systems	091
Chapter IV System Thinking	097
IV. 1 Emergence and Holistic Principle	097

IV. 2	Hierachical Structure of Systems	110
IV. 3	Communication and Information	119
IV. 4	Control and Regulation	128
IV. 5	Evolution and Self – organization	138
Chapter V	System Method	151
V. 1	Systems Science and Cross – disiplinary Studies	151
V. 2	Reduction vs Upduction, Analysis and Synthesis of Levels	157
V. 3	Functional Analysis and Black Box Method	165
V. 4	Metaphor, Analogy and Modeling	180

Part Three The General Theory of Complex Systems

Chapter VI	System Complexity	199
VI. 1	The Concept of Complexity	199
VI. 2	Basic Characteristics of Complexitiy	202
VI. 3	The Measurement of Complexity	209
VI. 4	Bremermann's Computational Limit	215
VI. 5	Discrete Dynamic Analysis of the Formation of Complexity	217
VI. 6	Stuctural and Functional Complexity and Its Growth	231
Chapter VII	Chaos and Dynamic System	240
VII. 1	Iteration and Attractor	242
VII. 2	Phase Control Maps, Bifurcation and Cascade	250
VII. 3	Fractal	258
VII. 4	Dynamic System and Chaotic Attractor	273

Part Four The Special Theory of Complex Systems

Chapter VIII	The Cybernetics of System Evolution	291
---------------------	--	------------

VIII. 1	Control and Meta - system Transition	293
VIII. 2	The Law of the Branching Growth of the Penultimate Level	298
VIII. 3	Concepts of Perceptual Control	307
VIII. 4	Eleven Levels of Human Cognition	312
VIII. 5	Its Application	320
Chapter IX	Self - organization theory of Systems	331
IX. 1	The Concept of Self - organization and Classical Cases	331
IX. 2	Conditions and Mechanism of Self - organization	341
IX. 3	Fluctuation, Bifurcation and Synergy	348
IX. 4	Self - organization of Autonomic Agents	361
Chapter X	Complex Adaptive Systems Theory	370
X. 1	The Concept of Adaptation	370
X. 2	Adaptive Agent	377
X. 3	The Classification System of the Simulation of the Modeling Function of Adaptive Agents	380
X. 4	The Genetic Algorithm	389
X. 5	The Adaptive Constrained Generating Process of Complex Systems	398

Part Five Management Theory of Complex Systems

Chapter XI	Management Thought of Complex Systems	405
XI. 1	Systems Thinking in Contemporary Theory of Organization and Management	406
XI. 2	Viable System Model and Its Concept of Organizational Cybernetics	414
XI. 3	Complexity and Management	430
Chapter XII	Methods of Complex Systems Management	436

XII. 1	Hard System Method	437
XII. 2	The Theory and Practice of Soft System Method	445
XII. 3	Critical System Thinking Method	451
Afterword		459
References		466
Index		480

第一编 导论

第 1 章

绪 论

系统科学是以系统为研究对象、以系统思想为中心的一类新兴的学科群,是20世纪初叶以来发展最快的一大类横断性、综合性科学。数十年来,随着系统运动的蓬勃开展,各种系统理论相继涌现,不同系统方法先后面世,一门新的系统科学也日臻完善。系统科学的发展,不仅为人们展示了一幅新的世界科学图景,而且极大地改变了人类的思维模式和思想方法。系统科学的研究成果在各个领域取得了广泛的应用,获得了一系列重大成果,为人类文明和社会进步做出了积极贡献。系统科学不仅是20世纪最伟大的科学革命之一,也是21世纪最有发展前景的科学之一。

作为本书的绪论,我们将主要从总体上说明系统科学是一门什么样的科学,包括系统科学的研究对象、特点和体系结构;系统科学的意义、地位及与其他学科的关系;本书的建构理念、逻辑框架与内容结构等。

►► 1.1 系统科学的研究对象、特点和体系

科学都以客观世界为研究对象,依据对象的不同来划分学科门类。系统科学和其他科学一样,也有其相应的研究对象。同时,系统科学作为一门新兴学科,又显示出与其他学科不同的一些特点。另外,人们也在系统科学的发展中不断探讨它内在的体系结构。

▷▷ 1.1.1 系统科学的研究对象

总起来说,系统科学的研究对象就是“系统”。但随着系统科学的发展,人们逐步区分出“系统”与“复杂系统”两类对象。因此不同学者对系统

科学研究对象的界定有不同的侧重点。

一类是侧重于将系统科学界定为以“系统”为研究对象的科学。

贝塔朗菲就把系统科学界定为是对各门科学(如物理学、生物学、心理学和社会科学等)中的“系统”的科学探索和科学理论,以及适用于所有系统的原理性学说——即一般系统论。他认为,凡“系统”皆有共同的一般方面、对应性和同构性。

国际系统协会联合会前主席、《国际一般系统论杂志》主编、美国纽约州立大学教授 G. 克勒尔(G. J. Klir)认为,对于什么是系统科学这个问题,基本上可以通过与系统科学相联系的活动、或者借助于它的探索领域来加以回答。它可定义为:

1. 系统科学乃是当系统科学家宣布他们在干科学的时候所做的事。
2. 系统科学是这样的科学研究领域,它的研究对象就是系统。

他进一步指出,如果不做解释,这些定义显然是不够严谨的。说定义1是有意义的,那是因为系统科学家所做的事确实存在,系统科学的意义原则上可以通过观察和分析系统科学家的科学活动来加以确定。定义2实质上又涉及到对系统的定义和理解问题。^①关于对系统概念的理解、定义和分类,本书将在第3章中加以讨论。

总之,系统科学是以系统及其机理为研究对象,研究系统的类型、性质和运动规律的科学。它着重考察各类系统的关系和属性,揭示其活动规律,探讨有关系统的各种理论、方法及其应用。

另一类是侧重于将系统科学界定为以“复杂系统”为研究对象的科学。

英国霍尔(Hull)大学学者 R. 福罗特(Robert Flood)指出,我们需要培养一种全局观念来理解系统科学,常见的回答是,它是所有与复杂性研究有关的东西。这个回答又提出了一个问题,即需要首先清楚地理解复杂性概念(本书将在第6章讨论复杂性概念问题)。我们的目标是建立一个概念框架,以此来认识复杂性。对复杂性的认识将有助于我们理解系统科学。^②

日本学者市川淳信也持类似的观点,他在1977年发表的《系统科学》

① G. J. Klir, *Facets of Systems Science*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 3.

② Robert L. Flood & Ewart R. Carson, *Dealing with Complexity — An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Press, 1993, chapter 2.

一文中指出,系统科学是以组织化的复杂系统为研究对象的科学。所谓组织化,是指系统的要素和它们之间的关系在内部和外部都受到规定;所谓复杂性是指系统具有等级结构,其要素之间的关系是多元的,且要素本身也是系统。^① 尽管市川淳信对于什么是组织化、什么是复杂性有待进一步明确,但他将系统科学界定为关于复杂系统的科学则是明确的。

可见系统科学是研究复杂系统的种类性质和演化机制、揭示各种复杂系统在演化过程中遵循的共同规律的现代前沿科学。

上述两类对系统科学研究对象的界定应该说都有道理。从科学认识的进程来看,人们总是先研究相对简单的系统,然后研究相对复杂的系统。人们对复杂系统的较好的认识,还是近20多年来的事。加之客观存在的系统在某种意义上绝大多数是复杂系统,因而“复杂系统”即成为系统科学研究的主要对象,进而“复杂系统科学”成为“系统科学”研究的前沿。因此,系统科学既可以“系统”为研究对象,也可以“复杂系统”为研究对象,但中心内容是复杂性和复杂系统。在本书的相关表述中,我们有时提“系统科学”,有时特别强调提“复杂系统科学”,其意即此。

▷▷ 1.1.2 系统科学的特点

说系统科学是一类新兴科学、综合科学,那么为什么称其为“新兴科学”?它和其他科学尤其是传统科学相比,究竟新在那里?有何特色?要回答这些问题,就要探讨系统科学的特点,从而加深对系统科学学科性质的认识和理解。

第一,系统科学的研究对象主要是“一般系统”。如上所述,系统科学的研究对象无疑是系统,然而世界上的具体系统为数众多而又千差万别,系统科学究竟是以什么系统作为其研究对象呢?R. 罗森(Robert Rosen)敏锐地注意到这一问题,他指出:“我们观察到‘系统’这个词几乎从来没有被单独使用,一般都有一个形容词或其他限定词:物理系统、生物系统、社会系统、经济系统、公理系统、宗教系统,甚至一般系统”^②。系统理论当然要研

^① 市川淳信:《系统科学》,《世界科学》1981年第10期。

^② Robert Rosen, “Some Comments on Systems and System Theory”. From Int. J. Gen. Syst. 13. 1. Gordon and Breach, Science Publishers Inc.

究这些系统,但系统科学的主要任务不是研究某个或某类具体的系统,而是要揭示所有具体系统共同遵守的一般性质。所以,系统科学的研究对象不是具体系统,而是抽象的一般系统(*general systems*)。因此我们认为,系统科学的研究内容也主要是揭示一般系统的“同构性”问题。所谓系统的同构性,是指各个不同性质的系统之间所表现出的存在方式和运动方式上的一致性,即所有系统共同遵守的规律。

第二,系统科学的研究任务主要是“系统性”。R. 罗森进一步指出,上述如物理系统、社会系统等用法告诉我们,当面对某种系统时,系统的某些性质归于形容词,而某些性质则归于“系统”,当然有些性质也归于二者。那个形容词描述的是其特殊性或具体性,即它指的是系统的具体“事物性”(thinghood);而“系统”描述的是独立于具体事物性之外的那部分属性,即“系统性”(systemhood)。事实上,一般系统论创始人之一的贝塔朗菲(L. Bertalanffy)早就主张“撇开物质、能量等概念,在纯粹的形态上研究系统”,他实际上抓住了系统科学的本质。在科学史上,由于亚里士多德区分了物质和力(能量),有力地推动了自然科学的发展。同样,在系统研究中区分出“事物性”和“系统性”,也有力地推动着系统科学的发展。

G. 克勒尔指出,按照事物性和系统性的区别,系统科学是集中研究系统的“系统性”性质,而不是研究它们的“事物性”性质。经典科学的学科边界是依赖于事物性而独立于系统性的,它们探讨事物性远远超过探讨系统性。它们所研究的是事物之间的差别,而不是事物如何组织起来之间的差别。^① 所以,经典科学的学科是事物导向的,所谓实体中心论就反映了这一点;而系统科学是系统和关系导向的,即所谓系统中心论所指的东西。当然,在科学探索和认识客观世界中,经典科学和系统科学发挥着同等重要的作用,它们是现代科学的两个互补的维度。

第三,系统科学具有跨学科性。随着现代科学发展既分化又综合的大趋势,跨学科运动乃大势所趋且方兴未艾。对此,著名系统科学家 K. 包尔丁(Kenneth D. Boulding)曾经指出:“如果要使这场运动有所收获,那么它就必须某一和谐的框架之中进行运作,因为跨学科太容易蜕变为

① G. I. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2001, p. 6.

无学科。因此,跨学科运动要想保持其形式与结构的辨识力,即包含在各个学科中的‘学科性’,那它就应该发展一套属于它自己的结构。我认为这是一般系统理论的神圣使命。”^①包尔丁不仅指出了系统科学的跨学科性,而且也提出了系统科学建设与发展的正确方向。今天,从系统科学发展的实践来看,系统科学的学科界限是次要的,并且它的分类有自己的标准,而在经典科学中,学科界限是分明的,所以系统科学已成为一门跨学科的科学。表现为:其一,不同的具体系统和不同的传统学科知识以及相关的问题,在系统科学中,作为整体而不是分门别类地进行研究,具有交叉性。其二,系统科学的成熟理论和方法论也适用于经典科学,具有横断性和综合性。系统科学的这种跨学科性对于不断划分甚至断裂为无数狭隘专业的经典学科有着统一的影响,它提供了统一的原理来超越它们相互之间的边界。

▷▷ 1.1.3 系统科学的体系结构

系统科学本身也是一个系统。凡系统皆有结构,因而系统科学作为一类科学系统也有自己的体系结构,而且其体系结构严谨和完善的程度是其成熟与发展的标志。由于系统科学作为一门新兴科学尚处于不断发展和完善之中,加之理论众多、观点纷呈、研究面广、学派林立,所以到目前为止,系统科学界还没有形成一个统一的、公认的系统科学体系。下面我们介绍几种国内外较有影响的系统科学体系,其中包括某些带教科书性质的体系,它们在某种程度上也是对系统科学体系见解的反映。

1. 贝塔朗菲纲领。贝塔朗菲在1971年发表的《一般系统论的历史和现状》一文中建构了一种系统科学的体系结构。他认为系统研究可分为系统技术、系统科学和系统哲学三个层次,并分别论述了这三个层次的研究对象、研究方法、存在问题及发展趋势。这一观点在国际系统科学界产生了广泛影响,被称为贝塔朗菲纲领(图1.1)。

2. 市川淳信的系统科学体系。日本学者市川淳信在1977年也建构了一种系统科学的体系结构。他认为,系统科学作为一门科学,应由系统概

^① Kenneth D. Boulding, "General Systems Theory—The Skeleton of Science". From Manage. Sci. 2, 197, 1956. in George J. Klir, *Facets of Systems Science*. p. 292.



图 1.1 贝塔朗菲纲领

念、一般系统理论、系统理论各论、系统方法论和系统方法的应用等五部分成等级结构构成。这一系统科学体系的图解呈三角形,如图 1.2 所示。

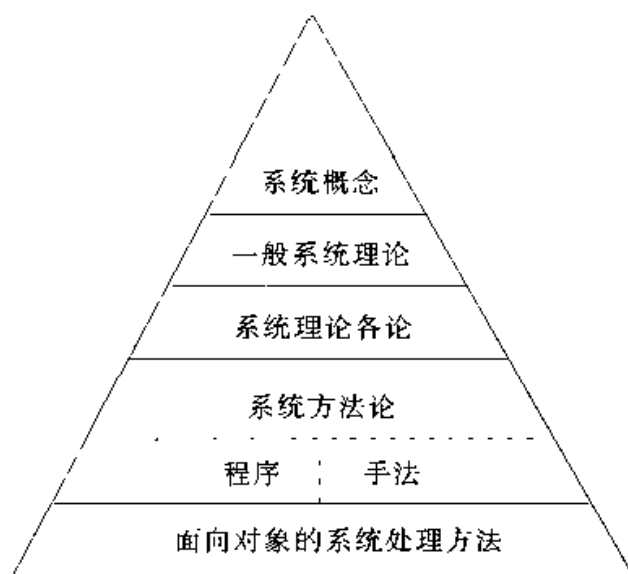


图 1.2 市川淳信三角形体系

3. G. 克勒尔系统科学教材体系。美国学者 G. 克勒尔作为国际系统协会联合会前主席、著名的系统科学专家,在长期的系统科学研究和教学过程中,于 2001 年出版了一本颇有影响的系统科学教材——《系统科学面面观》。该书按下列体系展开了对系统科学的介绍。

系统与系统科学:关于系统概念的定义及其特性、系统科学的界定等。

系统运动与系统科学的展望:主要分析系统运动产生的根源和系统科

学发展的历史背景,概括系统科学发展的现状,系统科学的地位和影响,系统科学发展的趋势与未来展望。

概念框架:主要介绍归纳方法和演绎方法,系统的认识论范畴与系统的认识论层次。

系统方法论与系统元方法论:从系统问题的解决入手,论述系统模型与系统建模,计算机的方法论作用。系统元方法论主要阐述方法的特征及方法论范式。

系统知识:说明传统知识与系统知识的区别、系统科学实验室、系统科学定律及元系统方法论等问题。

复杂性与简单化策略:什么是复杂性,复杂性与简单性,系统简化策略。

目的定向系统:目的和行为、目的方向系统的范式与类型、适应系统等。

4. 钱学森框架。我国著名科学家钱学森于上世纪80年代初提出了“三个层次一座桥梁”的学科体系的一般框架,即任何一门完善的科学都应该包括基础(基础理论)科学、技术(应用理论)科学和工程技术(应用技术)三个层次,然后再通过一个桥梁(比如系统科学哲学、自然辩证法等)与哲学相联系。基于这一一般框架,他提出了系统科学的体系结构,如图1.3.1^①

由许国志主编,2000年出版的《系统科学》一书,基本上按照钱学森的框架展开编写,在介绍系统的基本概念与方法后,用大量篇幅阐述作为系统科学的基础科学层次。在全书11章中用了7章介绍连续动态系统、离散动态系统、系统的随机性、系统的自组织、简单巨系统、复杂适应系统、开放的复杂巨系统等被认为是系统科学的基础科学理论的内容,然后只用了两章分别介绍技术科学层次的系统科学和工程技术层次的系统科学。

►► 1.2 系统科学的意义和地位

系统科学的产生不仅意味着在现代科学总体系中又增加了一门新兴科学,而且关联着20世纪的一场科学革命。这场革命不仅是对西方科学传统

^① 钱学森等:《论系统工程》,湖南科学技术出版社1982年版,第266页。

等,因而它是一定历史时期科学活动和科学理论的思维基础和逻辑前提。系统科学和复杂性研究的兴起,改变了近代自然科学赖以生成和发展的侧重机械分析的思维方式,开启并形成了系统综合的思维方式。苗东升教授认为,它体现在科学研究的各个方面:从孤立地研究对象转向在相互联系中研究;从用静止的观点观察事物(存在的科学)转向用动态的观点观察事物(演化的科学);从强调用分析的、还原的方法处理问题转向强调整体地处理问题;从研究外力作用下的运动转向研究事物由于内在非线性作用导致的自组织运动;从实体中心论转向关系中心论;从排除目的性、秩序性、组织性、能动性概念转向重新接纳这些概念;从偏爱平衡态、可逆过程和线性特性转向重点研究非平衡态、不可逆过程和非线性特性,等等。^① 这些变化都归因于系统科学所带来的科学思维方式的变革。

其次,系统科学以其综合性、跨学科性和方法论的普适性影响并促进当代科学的发展。系统科学,特别是复杂系统科学以其独特的思维方式和科学的自然观、时空观,以有机和生命的意义理解世界,探索以往科学未曾涉猎的领域,揭示出比传统科学更为广阔也更为真实的现象世界。系统科学由于其横断性、综合性和跨学科性,它的一些基本思想、基本观点、基本理论和基本方法,对其他科学领域产生了广泛的影响。这种影响不仅大大推进了相关科学的发展,也解决了许多科学难题。如系统科学展示的时空结构观念的变化,使人们得以在新的科学视野下发现新的科学规律,重建宇宙秩序的新图景。牛顿经典力学、热力学第二定律与达尔文进化论对宇宙系统演化方向的相互矛盾的结论,在系统科学那里得到了一种解释,使对这一难题的解决取得了巨大的进展;还原论和整体论旷日持久的争论在系统科学那里可以做出一种回答;被称为“可重构性分析”(reconstructibility analysis)的方法给我们提供了一种关于整体和部分之间关系性质的新的视角,这种方法远远超越了从还原论和整体论中产生的思维方式。^② 另外,系统科学产生于科学发展的综合化趋势,同时它的科学使命也在于进一步促进跨学科、综合性科学的发展。

① 苗东升:《系统科学精要》,中国人民大学出版社1998年版,第20—21页。

② George J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001, p. 201.

第三,系统科学超越了西方中心主义,为中西文化与科学的交流对话提供了新的历史契机。系统科学作为一场科学革命,不仅具有重要的科学意义,而且具有重要的文化意义。系统科学产生于多元文化时代,它确实“携带着更能为不同的文化传统所接受的普适信息”^①,有利于促使世界上经历了不同发展路径的科学和文明相互尊重和相互沟通。事实上,随着系统科学的发展,人们越来越明确地认识到,科学的哲学世界观存在着不同的体系:以东方精神为标志的侧重整体性的理论构架和以西方主流哲学为代表的侧重分析的还原论理论体系。然而,人类科学知识发展的最奇妙之处也许就在于,它不时地要向传统复归。系统科学的发展,将改变“西方中心论”,使更多的西方人希望从东方传统中去寻求思维方式和科学精神。系统科学“范式”,将是“整体论”与“还原论”思维方式的互补,是东方传统与西方传统科学精神的共融。著名的系统科学家、诺贝尔奖获得者普利高津(I. Prigogine)指出:“我们相信,我们正朝着一种新的综合前进,朝着一种新的自然主义前进,也许我们最终能够把西方的传统(带着它那实验和定量表述的强调)与中国的传统(带着它那自发的自组织的世界观)结合起来。”^②

第四,系统科学是信息时代的二维科学,是信息社会的智力工具。美国系统科学家 G. 克勒尔从人类社会发史的高度阐述了系统科学在信息时代的重要意义。他认为,人类经历了前工业社会、工业社会、信息社会三种社会形态,在三种类型的社会中,科学的角色各有不同。前工业社会主要是以常识、手工艺技能等为特征的前科学。工业社会主要是基于实验方法、科学原理和机器技术的科学,它本质上是一维的科学,因为它的各种学科和专业的出现主要是由于实验(使用仪器)程序的不同,而不是所研究系统的关系特性的差异。对于信息社会,克勒尔指出:“这一新型社会的突现和发展始终同计算机(或信息处理)技术以及与此相联系的智力发展,如控制论、一般系统论、信息论、决策分析和人工智能等密切相关。”^③信息社会的科学以新维度的出现为特征,理论上基于系统科学与实验方法的结合。因此信

① 李约瑟:《中国科学技术史》(第二卷),科学出版社、上海古籍出版社 1990 年版,第 329 页。

② 普利高津:《从混沌到有序》,曾庆宏等译,上海译文出版社 1987 年版,第 57 页。

③ G. J. 克勒尔:《信息社会中二维的科学的出现》,载《哲学研究》1991 年第 9 期。

息社会的科学可以描述为二维科学,它超越了基于科学实验之间的边界并使人们有可能发展出一种真实的跨学科方法论,从而更加适合处理信息社会中内在的各种大规模的社会问题。^① 系统科学的发展已经证明,它是信息社会的智力工具。各种系统理论是建设信息社会必需的科学理论,各种信息技术、自动化技术、系统工程等是建设信息社会必需的基本技术。总之,信息社会的方方面面,政治的、经济的、文化的、生态的、军事的、管理的等等,都需要从系统科学中寻找理念、思路、原理和方法。

►► 1.3 本书的建构理念与体系结构

▷▷ 1.3.1 本书的建构理念

关于如何建构或以什么理念建构系统科学的体系结构,一些著名的系统科学家,从贝塔朗非到艾什比(W. Ross Ashby),再到包尔丁等人,都做过论述。贝塔朗非指出:“这个领域有两种可能的入门方式。一种可能的方式是径直接受某一种合用的系统模型和定义,严密地推导出相应的理论。……另一种方法即本书的方法,就是从各种不同学科所出现的问题出发,说明系统观点的必要性,然后用实例或详或简地介绍”。^② 艾什比也提出了建构系统科学体系的两种途径。一种是由贝塔朗非所开拓的,把已发现的世界作为研究对象,考察其中的所有系统,然后总结出那些被证明为正确的理论。这个方法本质上是经验性的。另一种途径是从另一端出发,将所有可能的系统都作为研究对象,而不考虑它们是否真正存在于现实世界之中。如同物理学中的有质量无体积的粒子、没有摩擦的滑轮、没有质量的弹簧一样,系统科学最好也有类似的逻辑概念。要探究现实世界更高层次的关系或规律,就必须开发一个严密的系统逻辑结构,以使所有的形式都能在其中找到它们的位置和关系。因此,艾什比认为,系统科学应该从抽象性和普遍性向下开展工作,而不是从经验性向上

① G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001, p. 53.

② 贝塔朗非:《一般系统论》,林康义、魏宏森等译,清华大学出版社1987年版,修订版序言,第1页。

开展工作。^① 包尔丁提出的两条途径中,一条途径是仔细审视经验世界,从中挑选出某些出现在很多领域中的普遍现象,然后再想方设法建立与这些现象相适应的普遍的理论模型。第二条途径是按照基本行为单位组织的复杂程度将经验世界分成不同等级,然后再对每一层级分别进行抽象研究。^② 包尔丁采取第二条途径对系统本身按复杂程度划分为九个层级或九类系统。系统科学家切克兰德(Peter Checkland)非常看好这个研究进路。概而言之,系统科学体系结构的建构有两种可能的途径和方式,一种是由抽象到具体的,甚至是形式化的逻辑演绎,一种是经验性的理论概括。

我们认为,系统科学目前尚处于发展之中,远未完全成熟。本书不可能也无能力采取完全演绎式的逻辑方法来进行论证和建构体系。但是这个领域的研究已经有着共同的系统范式或复杂性范式,并且不同的学派之间在概念和规律的论证上有相当大的同构性,因而对这门科学的一个个学派或一个个分支仅做罗列式的介绍,以此来建构系统科学的体系也是不合适的。因此本书便采取逻辑与历史相统一的原则,以及归纳与演绎相结合的方法,来建构体系结构和组织篇章顺序。首先,我们用“系统运动”一章基本上按历史顺序介绍系统科学发展的历史进程,勾勒出系统科学发展“三次浪潮”的历史轨迹。而在后面的篇章安排中,我们并不是机械地按照历史年代来进行理论论述。例如,虽然“混沌与分形”的研究是在20世纪70年代之后才成为热门话题的,它的研究总体上迟于普利高津和哈肯等人创立的自组织学说,但考虑到混沌动力系统的研究对于研究复杂系统的自组织学说更具有一般原理的性质与意义,因此我们将混沌分形以及一般的复杂动力学系统理论列入“复杂系统总论”篇,让它们先于复杂系统自组织理论的章节以及先于早已建立的多层次控制系统理论(第8章)得到论述。这就是说,系统科学的历史从那里开始,我们的《导论》的思想进程也应该从那里开始。而本书的思想进程和逻辑进程的进一步发展,不过是历史过程在抽象的理论体系上的前后一贯的反映,当然,这种反映是被体系的逻辑要求所修正过了的。这就是大家所熟知的建构理论体系的逻辑与历史相统一的原

① W. Ross Ashby, "General Systems Theory as a New Discipline". From Gen. Syst. Yearb. 3, 1. 1958. in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. pp. 299-308.

② Kenneth D. Boulding, "General Systems Theory - The Skeleton of Science". From Manage sci. 2. 197. 1956. in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. p. 293.

则。

至于在组织本书的逻辑体系时,如何处理演绎与归纳之间的关系问题,总体来说,本书要对一个概念或一个原理进行充分论证时,一般不引进那些没有定义过或论证过的概念和原理作为论据。除非作为论据的这些概念和原理是一些常识概念或其他学科(例如物理、化学、生物或经济学和社会学)的概念,对于这些概念,我们假定读者已经熟悉。这就是说,我们将系统科学的概念与原理,原则上划分为“在前概念”和“在后概念”,并尽可能不运用在后概念来定义在前概念。否则就会陷入“无穷倒退”和“循环论证”,犯了逻辑学上的大忌。当然,由于系统科学尚未成熟,我们不可能采取公理体系的方法来建构本教材的理论体系。因此,本书的篇、章、节的安排至多也只能做到是准演绎性的。至于对某一系统科学原理的论证,我们则力图发挥归纳方法的优点:从具体到一般,运用最典型、最著名的实验案例来说明原理。例如我们论证系统自组织理论时,就充分运用了贝纳德元胞、布鲁塞尔器和激光形成过程这些经典案例。本书解说各种系统原理的经验事实事例是经过精心挑选的,请读者尽可能不要忽略过去,以免丢失系统原理的科学性。

▷▷ 1.3.2 本书的体系结构

本书划分为五编:导论、一般系统论、复杂系统总论、复杂系统分论和复杂系统管理论。

第一编导论,包括两章。第1章《绪论》讨论系统科学的研究对象、性质特点和体系结构,特别说明系统科学的新视角与经典科学的传统视角之间的区别。本章还阐述了系统科学的地位与作用,特别指出系统科学在当代思维方式变革中的作用,其在处理当代世界面临的复杂问题中的作用。最后说明了本书的建构理念和体系结构。第2章《系统运动》从历史发展的角度讨论了一个世纪以来系统思想和系统科学发展的历程,特别讨论了近半个世纪以来跨学科研究的发展和系统思维的涌现。本章在阐明系统运动产生的若干历史根源后,着重分析了系统科学发展的三次浪潮,这就是20世纪20—60年代的一般系统论和控制论研究浪潮,70—80年代的系统自组织理论研究浪潮以及80年代以来复杂系统科学研究浪潮。本章还对复杂系统科学的理论与实践在今后的发展趋势做出某种解说和展望。

第二编为一般系统理论。本篇包括3章,讨论系统科学的最一般的概念、思想和方法。第3章《系统概念》辨析了系统科学领域中各家各派(例如主观学派、客观学派、形式主义学派和建构主义学派等)关于系统概念的定义,并分析了它们各自的特点及其共同点,将系统定义为处于相互关系中,并与环境处于相互关系中,从而形成动态组织整体的元素的集合。由于我们将“动态组织整体”的特征加进贝塔朗菲的传统的系统定义中,所以在本章中就不仅从静态上分析了系统概念的四个要素:元素、结构、环境与功能,而且从动态上分析了系统的状态和状态的变化,以及系统状态变化中的相对稳定性。这就为以后关于复杂系统的自组织、突变、分叉和吸引子以及适应性景观论证提供了理论基础。第4章《系统思想》是本篇的核心。著名系统科学家P. 切克兰德经过多年的研究,于1981年提出系统思想建立在两组概念的基础上,即(1)突现与层级,(2)通讯与控制。这个观点广为系统科学家们所接受,R. 福罗特曾将这两组系统概念形象地表达为两姐妹共打一把伞,共有两把伞。依据系统科学第三次浪潮的成就,我们提出了第三组概念,这就是进化与自组织。在切克兰德的基础上增加了两姐妹,增加了一把伞。本章对这三组概念做了相当详细的讨论,特别是对与这六个概念相关的原理,如系统整体性原理,系统等级层次结构原理、信息量计算原理,控制论的必要多样性原理,广义进化论原理,进化与自组织相互关系原理等,做了相当精确的论述。这些原理虽然是在一般系统论的框架下提出的,但它们将在复杂系统理论中有着具体的运用与发挥。第5章《系统科学方法论》讨论系统科学广泛使用的最有代表性的方法,首先是打破学科界限进行跨学科研究的方法。由于跨学科的研究,单纯的分析还原方法已经不够用了,于是系统科学发展了自己的整体方法、向整体上索的方法以及层次分析与层次综合的方法,由此便产生出功能分析方法和黑箱方法。这些方法论上的新武器表明,系统方法并不是与还原方法相对立的,而是用创造性的整体论补充还原论,并使两者结合起来。在本章中,我们特别注意研究隐喻、类比与模型的方法以及计算机模拟的方法。当贝塔朗菲等人建立一般系统论以及维纳等人建立控制论之时,不同领域之间的类比与模型、同态与同构性的论证,就是他们的新学科建立的方法论前奏曲。到了最近十多年,由于语言学的发展、认知科学的发展以及科学哲学和逻辑学的发展,在科学方法论的宝库中已经将隐喻与类比、模拟与模型提到一个非常重要

的地位,研究它们显然是系统科学的刻不容缓的任务,并且很可能是系统科学方法论上的“大结局”。

第三编为复杂系统总论。复杂性和复杂系统问题是系统科学的核心和前沿,因此在分别讨论各种不同类型的复杂系统之前,需要从总体上对复杂性和复杂系统的动力学进行讨论。第6章《系统复杂性》首先分析复杂性的概念内涵以及复杂性的基本特征。保罗·杰里尔斯(Paul Cilliers)将它归结为十大特征,而《国际维基大百科全书》将它归结为九大特征。我们主张将复杂性的特征归结为系统元素及其相互联系的多样性,这些联系的非线性、非对称性及其处于混沌的边缘等四大特征。在此基础上我们分析了复杂性的度量,运用信息论和图灵机定义了描述的复杂性和计算的复杂性。进而,我们从动态的观点分析了结构复杂性、功能复杂性以及环境复杂性的增长和进化。为了说明这个问题,需要有一套新数学工具,这就是非线性系统动力学。因此本章使用了其中新发展起来的离散动力学、元胞自动机理论来分析系统复杂性的形成和发展。这个理论用元胞模型向我们表明:简单的元素和简单的行为规则经反复的叠代,就会形成包括虚拟生命在内的各种各样的复杂性结构,它位于元胞自动机分类的第四类里,徘徊于混沌与周期性行为之间,故曰“混沌的边缘”。第7章《混沌与动力系统》运用非线性连续动力系统讨论混沌与分形。混沌理论是研究复杂性和复杂系统的最重要工具。有学者认为,它的成就可以与相对论和量子力学相提并论。本章首先分析几种基本函数的叠代方程及其图形,研究它们所趋向的吸引子,并利用相控图来研究吸引子的各种形态,它的分叉与层叠,研究它们怎样进入混沌区,又怎样走出混沌区。本章最后总结概括出混沌系统或系统的混沌状态的五大特征,这就是(1)系统状态的无规则性和不重复性,从而决定它的某种不可预测性;(2)混沌系统具有决定性,混沌方程不具有随机项,因而是决定论的;(3)对初始条件的极度敏感性,从而可能出现“蝴蝶效应”;(4)它的吸引子的区域性和历遍性,从而被称为奇异吸引子;(5)它具有内部结构,并且存在着“有序之窗”。这是一个充满奇异性的世界,引起了科学家和哲学家的极大的兴趣。另外本章还讨论了当代新的几何学:分形几何学。它的最基本特征是分数维和部分与整体的自相似,正是这些特征使它成为复杂性和复杂系统的几何表示。

第四编为复杂系统分论。本篇分别讨论三类不同类型的复杂系统。复

杂系统的运作与进化,有三种机制最为重要,这就是集中控制机制、自组织机制和适应性机制。与此相适应,有三种不同的复杂系统模型,即多层次控制系统模型、自组织系统模型和复杂适应系统模型,分别由不同学派的系统科学家创立和研究。它们之间不是互相排斥的,而是模型互补、机制互补和功能互补的。第8章:系统进化控制论讨论多层次控制系统模型。这个复杂系统模型早在20世纪70年代分别由当时苏联原子能物理学家V. 图琴(V. Turchin)(后移居美国,在纽约州立大学计算机系任教)与美国芝加哥大学心理学家和电子工程师威廉·鲍威斯(William T. Powers)独立发现或发明。图琴强调的是复杂系统的层级控制进化,他称之为“元系统跃迁”,它的历程是:神经细胞的兴奋是对行为的控制,反射是对细胞兴奋的控制,联想是对反射的控制,思想是对联想的控制,文化是对思想的控制,复杂系统就是这样通过层级的元系统跃迁从无生命世界进化到人类的文明。而威廉·鲍威斯则精确地分析了人类认知与行为的11个层级(强度、感觉、构型、转换、事件、关系、范畴、序列、程序、原则和系统观念),揭示了人类心理行为的控制机制和控制结构。这个理论模型是十分重要的,它在国外正在进行广泛的传播与推广,由本书作者首次介绍到中国来。第9章《系统自组织理论》主要介绍和讨论由比利时布鲁塞尔大学普利高津和德国学者H. 哈肯(Hermann Haken)等人首创的系统自组织理论。本章首先分析开放系统自组织的主要的条件与机理:远离平衡态的动力行为,它们从局域非线性相互作用进展到整体模式的突现,通过涨落、分叉和协同作用到达序的形成。不过在本章中,我们并不限于以传统的化学耗散结构和物理学的激光系统为典型案例来讨论自组织问题。我们在本章中着重研究和阐明的问题,是将自组织问题推广到行动主体的自组织,即讨论那些具有目的定向和有某种认知能力的自主性行动者之间如何能够实现自组织,形成有序的群体。蚂蚁、兽群、鸟群的自组织行为成了本章讨论的一个重点。第10章《复杂适应系统》主要介绍和阐明适应性、适应性景观和适应性行动主体的概念,分析适应性行为主体的建模功能和学习功能,运用计算机模拟分析遗传算法和适应性神经网络,运用数学方法分析复杂适应系统的突现生成过程的机理。

第五编为复杂系统管理论。组织与管理科学不仅是系统科学形成的主要理论来源之一,而且是系统科学的主要应用领域。因此,“系统管理学

派”是当今复杂系统科学研究的重要学派之一。我们十分赞同和重视这个学派的工作,并正在与这个学派建立经常性的联系。我们认为《系统科学导论》如果缺少这一编,就不会落到实处。本编分为两章。第11章《复杂系统管理思想》首先讨论当代组织管理理论的发展怎样经过理性模型进到人际关系模型,再进到系统模型。虽然组织与管理的系统模型只是众多管理学派中的一个学派,但它却是管理学发展的一个重要趋势。经过仔细的研究,我们同意曾任国际系统科学研究会(ISSS)会长的M. 杰克逊(Michael C. Jackson)的意见,即认为S. 贝尔(Stafford Beer)的“活系统模型将过去约50年里在组织理论学科中发现的成果融为一体”^①。因此在本章中我们着重分析和介绍活系统理论,并进一步阐明各种复杂系统科学原理在组织与管理领域中的具体运用。第12章《复杂系统管理方法》中,我们分析了在各自适用的领域中行之有效的系统管理方法,包括硬系统工程方法、软系统方法、批判系统思想方法和多元主义系统方法。

总之,经过近三五年来努力,我们参考和综合了大量国外和国内系统科学的最新教材及最新研究成果,并经过我们的研究综合,博采众长形成己见,使本书成为包容性更宽、系统性更强、应用性更广、更为通俗易懂的教科书。它适合于各类系统科学专业、管理学专业、哲学社会科学专业、计算机专业以及其他相关专业的本科生和研究生,作为系统了解系统科学的基本原理及其应用的教材。本书附录了最新文献,包括各种电子文本、电子教材和Java文献。相关的电子文献都能打开,可以动态形象地说明许多抽象原理,使之能够演示出来。既适于深造又适于普及,只有高中毕业水平的学生,只要细心阅读,也能掌握其中绝大部分的内容。

① 迈克尔·C. 杰克逊:《系统思考——适于管理者的创造性整体论》,高飞、李萌译,中国人民大学出版社2005年版,第104页。

第 2 章

系统运动

“系统运动”这一概念由英国系统科学家切克兰德于 1979 年提出,用以表达自 20 世纪上半叶以来系统研究及其实践、系统理论及其应用、系统科学及其内容结构的形成和发展过程。^① 后来,国际上许多知名系统科学家都接受并使用了这一概念。

系统科学是 20 世纪以来形成的一个学科群。它就是在被称之为系统运动的过程中逐步发展起来的。一般来说,系统运动可以被看成是来自不同学科如数学、哲学、自然科学、社会科学、工程学和其他领域的研究者的一个松散的联合运动。由于当时的背景,他们拥有共同的观念,如共同的概念、原理、方法等,并把这些观念应用到一般的以及具体类型的系统,结果超越了传统学科之间的边界而形成系统科学。

2.1 历史上的系统观念和系统思想

系统科学虽然产生于 20 世纪,但人类历史上的系统观念和系统思想却源远流长,“系统”也有其“系统发育”史。一般系统论的创始人贝塔朗菲曾经指出,正像科学与其他领域中的每一种新观念一样,系统的概念也有一段漫长的历史。人类系统观念和系统思想的发展,大致经历了三个历史阶段,即古代朴素系统观念、近代辩证系统思想和现代系统科学。

^① Checkland, Peter. *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley & Sons, 1981. chapter 3.

▷▷ 2.1.1 古代朴素系统观念

朴素的系统观念,早在人类的古代就有萌芽。无论是在古代中国,还是在古代西方,人类在认识自然和改造自然以及在人类社会形成的过程中,都萌发了各种各样的原始的系统观念。这些系统观念集中地表现为整体性观念、目的性观念、相互联系观念和变化发展观念。它们大多寓于古代朴素的唯物论和朴素的辩证法之中,尤其表现在对整体、组织、秩序、结构、等级、联系、变化等概念的认识,以及在解决某些政治、工程和军事问题时所形成的某些系统方法之中。

在我国古代的思想宝库中,蕴含着丰富的系统观念。最早的系统观念是伴随对客观世界统一性的直观猜测产生的。在中国古代哲学中,它以朴素辩证法的形式表现出来。这些思想在现代被称为“有机自然观”的东方文明,得到世界文明的格外珍视,被看做是人类智慧的源泉,未来发展的希望。中国古代文献《周易》、《道德经》、《天论》、《孙子兵法》、《黄帝内经》等中所阐释的有无、阴阳、五行、八卦、经络、脏腑,以及天人相应等观念,都体现着丰富而深刻的系统思想。如阴阳五行学说用有与无、一与二、阴与阳等对立统一的关系来表达自然界的统一性,把万事万物看成相生相克的有机整体,有人称之为中国古代的“一般系统论”;^①老子的《道德经》深刻揭示了所有系统以及世间万物发展变化的道理;《黄帝内经》通过对经络、脉象、穴位等的研究,深化了对人体“系统”的认识;中医学中的脏象学说、经络学说、阴阳五行学说、气血津液学说、天人相应理论等,都充分体现了系统观念和系统方法。另外,从军事学上的“孙子兵法”到建筑学上的“拱桥殿宇”,从战国的“李冰治水”到秦朝的“万里长城”,无不显示出中华民族的系统思维、功能模拟及其实际应用。

在古希腊,众多的哲人也提出了许多宝贵的系统思想,体现为认识事物及宇宙的整体性、秩序性和结构功能性等。根据古希腊不同的哲学流派,可以归纳出四种不同的系统整体观,即以某种“始基”为基础的系统整体观,如泰勒斯(Thales)以“水”、赫拉克利特(Heracitus)以“火”、阿拉克西米尼

^① 邱正人:《阴阳五行及其体系》,第十一章《阴阳五行作为“一般系统论”》,台北,文津出版社1998年版。

(Anaximenes)以“空气”为世界的本原;德谟克利特(Democritus)以原子为基础的系统整体观;毕达哥拉斯(Pythagoras)以“数”为基础的系统整体观;柏拉图(Plato)以“理念”为基础的系统整体观等等。亚里士多德(Aristotle)作为古希腊百科全书式的伟大学者,他关于整体性、目的性、组织性的观念,关于事物生灭变化原因的“四因”说(质料因、形式因、动力因、目的因),以及关于事物的种类关系和范畴分类的思想等,可以说是古代朴素的系统观念最丰富、最有价值的遗产。特别是他的“整体不等于部分之和”、“整体大于部分之和”以及“结构对于事物的关键意义”的观点,是其具有整体论和目的论内涵的系统观的高度概括,至今还是系统理论的基本原则。^①

但是,从总体上看,无论是古代中国,还是古代希腊,其系统观念都是朴素的。由于受当时自然科学的发展和人们思维能力的限制,古代先哲们往往只能凭直觉与想像来编织系统之网。因而那种统一性和整体性是不完备的,其各个细节也是不明晰的。所以古代系统观念带有明显的猜测性和思辨性。

▷▷ 2.1.2 近代辩证系统思想

从15世纪兴起的近代自然科学,在其开头的二三百年内,其主要方法是归纳和分析方法。人们认为,整个自然界是由无数的物质质点构成的,因此,科学的任务就在于不断地对自然界进行分割和解剖,把事物尽量分解为各个独立的部分,然后分门别类地进行研究。这种方法论原则导致了16—18世纪总的科学思潮:把整体归结为部分的总和,把系统归结为元素的总和。这种方法对当时的自然科学发展来说当然是必要的,它反映了人类对客观世界认识方式的一个必然的历史阶段。但是,从人类认识史的发展来看,这种分析方法撇开整体系统的联系来孤立考察局部事物,势必形成一种机械还原论的思维方式。

尽管近代西方是以机械还原论的思维方式占统治地位,然而我们认为,系统研究和系统思想的发展在近代并没有中断,相反,有许多杰出的思想家发展了近代的系统思想。

在欧洲近代史上,以歌德(Goethe)、席勒(Schiller)等为代表的浪漫主

^① Aristotle, *Topics*. (350B. C.), Book VI. Part 13. Translated by W. A. Pickard-Cambridge.

义突出和强化的“整体”观和“有机”观,对系统思想的发展产生了一定的影响。许多近代哲学家,从莱布尼兹(Leibniz)的单子论到康德(Kant)的“批判哲学”,从谢林(Schelling)的系统思想到黑格尔(Hegel)的辩证系统观,都充分论述和发展了近代系统思想。

莱布尼兹在《单子论》一书中,强调单子的整体性、不可分性和独立性,强调单子间的相互联系性、单子的结构层次性、发展的动态性等思想,对现代系统理论产生过重大而积极的影响。控制论的创始人维纳称莱布尼兹为控制论的哲学“守护神”,一般系统论的创始人贝塔朗菲则认为“莱布尼兹的单子等级与现代系统等级很相似”。

德国古典哲学家康德的系统思想已达到相当完善的程度。在其批判哲学中,他明确地指出了“系统”的三个特性:第一,内在目的性,即系统的结构和功能适应于某种内在的目的;第二,自我建造性,即系统好像动物的生长一样可以内在地扩充增大;第三,整体在先性,即系统的整体形式不仅先天地规定了整体的内容,而且也先天地规定了整体中各部分所处的位置。贝塔朗菲认为康德的整体论、目的论等观点就包含着系统论的要素。

黑格尔作为近代辩证法大师,他的系统思想,在系统理论的形成和发展史上,起过十分重要而突出的作用。一方面,他集前人系统观之大全,另一方面,他的思想又直接影响到马克思、恩格斯和贝塔朗菲等人,促进了现代系统理论的形成和发展。黑格尔的系统思想突出地表现在他的有机进化整体观中。他的整体观有两大原则。第一是整体性的有机原则,认为整体与部分的关系,类似于有机体、生命个体的整体与部分、器官的关系。部分不能离开整体而独立存在,而整体又是高度分化的部分的统一体,与其部分有内在的、不可分割的联系。他举例说,譬如一只手,如果从身体上割下来,在解剖学者看来,按名称虽然仍可叫做手,但就其实质来说,已不是手了。第二是整体性的进化原则。黑格尔的整体观立足于动态来考察整体及其与部分的关系。他把有机体看做是一个不断运动、发展、进化的过程。其进化的根本机制是整体与部分、部分与部分之间的内在矛盾运动。

马克思和恩格斯在19世纪下半叶科学技术发展(主要是三大发现:能量守恒与转化定律、细胞学说、达尔文进化论)的基础上,批判地继承了康德、黑格尔的辩证法和系统思想。他们所创立的唯物辩证法,使系统思维方

式在新的科学基础上与辩证思维达到了新质的综合,使系统思想取得了哲学的表述形式,从而使系统思想不仅成为科学发展的重要思想源泉,而且成为辩证唯物主义的重要组成部分。在他们的著作中广泛地运用了系统概念,对复杂的社会经济形态、整个社会和自然进行了具体而深刻的系统分析和研究。因此,许多系统科学家也把马克思、恩格斯看做是系统科学的先驱者。

马克思把系统观用于分析社会问题,以社会形态的依次更替,科学而明晰地描述了社会发展的系统形式。马克思的整个社会理论是由两个等级的系统构成的。第一是分析级的,即找出一切社会形态所具有的抽象特征,这就是关于社会经济形态的理论。马克思又把社会经济形态视为一个大系统,该大系统又由三个子系统即经济基础、上层建筑和社会意识形态组成。第二是具体级的,即社会经济运作过程要素的分析。马克思在其巨著《资本论》中,把社会生产方式看成是由四个独立的要素构成的系统,即把生产关系、分配关系、交换关系、消费关系看成是一个整体的各个肢体,它们的相互联系、相互作用、相互循环与发展,构成整个“社会有机体”的运动与发展,并促使社会向更高的社会有机形态转化。

恩格斯早在 19 世纪中叶就专门研究自然科学的哲学问题,他注意到了众多的自然科学越来越明显地揭示出整个自然界的辩证的系统图景。另一方面,他又吸取了前人的系统思想,提出了许多重要的系统观点,为现代系统理论的诞生奠定了科学的起点。恩格斯认为,一切事物、过程,乃至整个世界,都是一个整体,从宏观到微观,从无机界到有机界,从自然界到人类社会,各种事物无不处在相互联系、相互作用之中。他指出:“我们所接触到的整个自然界构成一个体系,即各种物体相联系的总体”。^① 这样,恩格斯在创立自然辩证法时,便明确地提出了相当于“系统”范畴的“体系”概念,他不仅第一次提出了自然界的系统整体的客观模型,并按这一模型探讨了整个世界的层次结构,这些观点现已逐渐地为当代系统科学家们所接受。^②

① 恩格斯:《自然辩证法》,见《马克思恩格斯选集》,第4卷,人民出版社1995年6月第2版,第347页。

② Claus Emmeche, Simo Koppe, Fredrik Stjernfelt. "Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels". *Journal for General Philosophy of Science* 28. pp. 83-119, 1997.

►► 2.2 系统运动的根源

随着科学技术的发展和人类认识水平的提高,系统研究发展到现代,已成为轰轰烈烈的“系统运动”,其成果已达到更加完善的程度。于是,作为学科门类的系统科学的产生已是历史的必然了。系统运动为什么会在20世纪上半叶产生?或者说系统科学产生的历史背景是什么?对此,不同学者从不同角度做过概括。中国学者一般从科学革命、技术革命、哲学革命及思维方式的变革等方面来考察系统科学产生的历史背景。国际系统科学研究会前主席、美国学者 G. 克勒尔认为,系统运动的出现有三个来源:数学、计算机和可称之为系统思想的一群观念。^① 英国学者 R. 福罗特以系统思维为起点阐述了系统科学发展的四循环历程。^② 中国访英学者朱志昌从探索客观世界(系统科学和复杂性研究的历程)、理解人类思维(从系统哲学角度讲人工智能、自创生理论等的研究)、管理组织行为(组织设计与管理、系统方法等)三个层面阐述了当代西方系统运动。^③ 我们认为,系统科学的产生和其他任何重大科学事件一样,有着广泛的历史渊源和现实背景。这里我们着重从以下几个方面来分析系统运动的根源。

▷▷ 2.2.1 有组织复杂性研究和相关数学及计算机技术的发展

1. 有组织复杂性的研究

什么是有组织复杂性?在回答这一问题以前,让我们来了解一下关于台球游戏力学的研究。对于单个甚至两三个台球在球桌上的运动,经典动力学和微分方程完全可以做出精确的分析和预测。如果球的数量超过两三个例如十个八个,再来分析它们的运动状况,其难度则会令人惊讶。不是因为有理论上的困难,而是因为要在细节上处理如此多的变量的实际计算和

^① G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, chapter 3.

^② R. L. Flood & E. R. Carson; *Dealing with Complexity*. Plenum Press, 1993, p. 4, p. 7.

^③ 朱志昌:《当代西方系统运动》,见许国志主编《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社2000年版,第592页

预测工作被证明是不可行的。但是,令人惊奇的是,当球的数量继续增多到成百上千的时候,再来分析它们在球台围栏边内相互碰撞的状况,反而变得容易了,因为可以用统计力学的方法解决它。你也许不能描述某个特定台球的详细轨迹,但却可以有效精确地回答某些特定的重要问题,例如,在平均水平上,每秒有多少个球撞到特定的位置上?一个球在它被其他球撞上之前可运动多远?一个球多少秒钟要经历多少次撞击?等等。

经典的数学工具,以微积分方程为例,可适用于仅仅包含少量组分的问题,而这些组分是以完全可预测的方式联系的。统计方法的应用则刚好相反:它们要求系统包含大量的组分和组分行为的高度不可预测性(随机性)。因此这两种数学方法是各自适用于自己相关领域的。当其中一种方法很有效时,另一种方法则是完全没用。尽管这两种数学方法具有互补性,但它们能够解决的仅仅是那些有关复杂性和随机性问题的两个极端的情况。最难处理的问题就是介于两者之间的复杂性问题。

基于上述研究,威佛(Weaver)1948年在一篇经典的、尔后广为人引用的文章中,提出了一种新的系统复杂性分类方法,即将系统区分为有组织简单性、无组织复杂性和有组织复杂性三类。^①有组织简单性即为相对简单而确定的系统。事实上,上例中一两个球的位置和时间之间的关系就形成了一个18、19世纪的典型的简单性问题。无组织复杂性是指在一个系统中变量的数目非常大,而每个变量的行为是个别地不确定的,也许是完全不知道的。然而,尽管是杂乱的或未知的,但这些个别变量的总体行为,作为一个整体过程的系统,却包含了特定的有秩序和可分析的平均性质。统计力学方法在这种情况下是有效的,即当这些球在位置和运动上是分布式的杂乱的和无组织的方式时,统计方法起作用。

有组织简单性和无组织复杂性问题仅仅是所有系统问题中的一小部分。大多数问题是处于这两个极端之间的中间区域,威佛称之为有组织复杂性。这个中间领域的重要性,并不主要依赖于其所涉及的变量数是中等大小的,主要在于这些问题表现出组织的本质特征,而与统计方法能够解决

^① Warren Weaver, "Science and Complexity". American Scientist 36, 536, 1948. in G. J. Klir, *Facets Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, pp. 533-540.

的无组织情形恰恰相反。有组织复杂性问题的例子是大量的,具备有组织复杂性特征的系统不胜枚举,特别是在生命科学、行为科学、社会科学和环境科学中,以及在现代技术或医药学等的应用领域。当代和未来社会的发展均有赖于这些问题的解决,因此它要求科学做出第三次大的发展,即对有组织复杂性的研究。这个发展的意义和任务,远远大于18世纪处理简单性问题和19世纪克服无组织复杂性的问题。科学必须知道如何处理这种复杂性的问题。

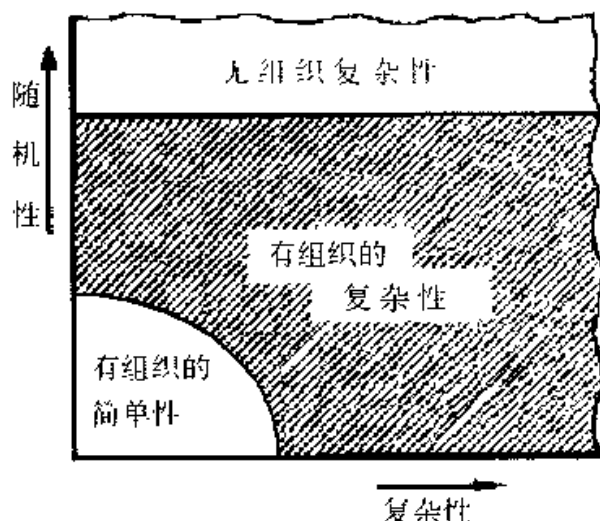


图 2.1 威佛的系统分类图

2. 相关数学的发展

在系统运动形成中的另一个重要因素是数学的发展。贝塔朗菲在很大程度上就是用数学的形式来表达他的一般系统论的。有的系统科学家甚至直接使用了“数学系统理论”这一术语,说明了数学与系统理论之间的密切关系。事实上,在系统运动中,人们运用各种各样的数学理论对各种具体的基本的系统概念进行形式化,并逐步发展出一个处理系统问题的形式框架。它使已经出现的定性的系统思想定量化,成为一整套数学理论、能定量处理系统各组成部分之间关系的一种科学方法,并反过来为这种科学方法对于具体系统的应用准备了数学模型和数学工具,或者进行了用特殊方法建立这种模型的细节研究。像50年代末至60年代初,在工程背景中为某个具体目的的系统理论都已被较好地数学化了。如出现了运筹学、博弈论、线性规划、决策树、网络分析等等。

在诸多的系统学派中,甚至有一个“数学系统学派”,其代表是由麦萨罗维克(M. Mesarovic)最初提出和发展起来的数学系统理论。这个理论的意义是以公认的系统概念为基础,即仅仅从一个公理出发,通过这个公理将系统概念以最一般的形式表达出来:系统就是诸集合的族,而关系就定义在这些集合上。即 $S = (T, R)$ 。这里 S 是系统, T 是集合的族, R 是定义在笛卡儿积集之上的关系。毫无疑问,数学分析方法和统计方法都是与系统科

学相关的。然而,系统科学的基本(主要)定位,是研究各种系统以及具有组织复杂性特征的相关问题。与研究有组织简单性和无组织复杂性相比,研究有组织复杂性要求新的数学工具和新的形式化手段。有一系列新的数学分支正在兴起,如混沌动力系统理论、叠代方程、元胞自动机、分形几何学、网络数学等等。从这个意义上说,数学的发展促进了系统运动,同时系统运动又加快了数学的发展,二者是相互促进的。

3. 计算机技术的应用

相关数学的发展还为系统理论与方法的实际应用提供了必备的、强有力的技术工具——计算机技术。系统理论及其有关原则一旦取得了数学表达形式和实现应用的技术工具,它就可以容纳下尽可能广泛的科学技术研究成果,使系统思维从一种思辨性的哲学思维方式发展为专门的新兴学科——系统科学。

另一方面,从复杂系统科学的研究对象与计算机应用的关系来看,有组织复杂性的特点就是其丰富性,所以不能过分简化,但又不能用有效处理高度随机性的办法来进行研究。因此有组织复杂性问题的一个最困难的方面,就是我们常常要做各种大量的组合搜索与选择,而又不遗失掉一些重要的元素与关系。但人脑的计算速度实在太慢了,记忆的范围也实在太狭窄了,这是人类智力的一个弱点,然而这恰恰是计算机的一种优势。这就是为什么在计算机技术出现之前,对具有组织复杂性特征的系统的研究无法获得成功的原因,也是为什么系统科学的发展与计算机技术的发展关系如此密切的原因。因此,系统科学极大地依赖于计算机,计算机是系统科学的实验室和最重要的方法论工具。系统科学,作为系统运动的一个产物,与计算机技术之间有着独特而密切的联系。计算机发展水平的提高开拓了新方法论的可能性,刺激了数学等学科的新发展,同时也促进了系统科学的发展。这三个领域——数学、计算机技术和系统科学是如此密切地联系着,计算机技术在其中具有关键性作用。它是使方法的可能性转换为方法的现实性的一种催化剂。

▷▷ 2.2.2 系统思维(systems thinking)的影响

数学和计算机技术是描述和处理系统现象的基本方法,并在系统运动中发挥了重要作用。然而,系统运动的原动力和决定性因素在于其观念层

面,即系统思维。从20世纪初开始,系统思维作为一种新的思维方式出现在各门科学、工程技术和哲学等领域之中,多方面影响到人们的科学思维方式和科学发展。系统思维对系统运动的发展做出了最重要贡献的是整体论(holism)的重新兴起。众所周知,整体论无论是在古希腊还是在古代东方的思想中早已有之。这种观念的重新兴起,在相当程度上是在19世纪末20世纪初作为还原论的对立面而出现的。还原论是16世纪以来科学中的主要方法论观点。20世纪初,还原论在一些学科中、尤其是在心理学和生物学中遇到了困难,而求助于整体性的系统思维。

心理学中的整体运动主要是指被称为格式塔(gestalts)的理论,其概念最早由德国诗人歌德提出。在德语中,“格式塔”意味着其部分结合在一起的组织整体。格式塔理论的基本含义是指:存在整体,它的行为不能由它们的单独元素所决定,但那些部分之间的作用过程是由整体的内在性质所决定的。格式塔理论的目的就在于探讨这种整体的内在性质,后来演变为“完形心理学”,指出人们的知觉并不是通过感觉的总和而产生的,而是突然整体地出现的。如图2.2所示,从手的知觉突然转换到人头像的知觉,观察者的感觉材料都是一样的,为什么会有不同于感觉的知觉呢?那是“整体大于部分之和”或“整体不等于部分之和”的结果。

19世纪后半叶,在生物学中,还原论的局限性已开始被察觉。许多生物学家认为,整体性思维对于全面理解一些生物现象是根本性的。然而直到19世纪20年代后期,生物学中的整体思维才以一种一致和纲领性的方式明确表达出来。最显著的就是贝塔朗菲的机体生物学,从而导致了一般系统论的产生。

后来,人们进一步认识到,“整体性”决不仅仅局限于生物领域,它可见于存在的所有阶段。“整体性”根源在无机界中,但在有机生物界,其普遍



图 2.2 格式塔图形

表现获得了清晰的表达,而在智力和精神层次达到了最高级的表达。因此整体性是宇宙自然在它的时间进程中最显著的表达,是宇宙自然的一种内在性质,它刻画了宇宙进化过程的轨迹。整体论是隐藏在这种进程中的内在驱动力量。

1926年,南非国务活动家和哲学家斯穆茨(Jan G. Smuts)出版的《整体论与进化》一书,可被视为当时对整体论进行了最全面、最彻底研究的经典代表作。在该书中,斯穆茨不仅创立了“整体论”这个词,而且从历史的视角和系统科学的角度,将整体性提升为一种一般的自组织原理,而这个原理是自然界在进化的各个层次中所表现出的基本原理。从无机物到生命的多种形式,从人类社会到人类思维的进化发展,无不遵循这一原理。尤其值得指出的是,斯穆茨在这本书中还研究了人们最近颇感兴趣的在复杂性探索中从混沌到有序的自组织过程。

整体论作为系统思维的核心,在系统运动中是以还原论的对立面出现的。作为两种不同的思维方式,它们最初是完全对立的,即完全倾向于整体论和彻底拒绝还原论在系统运动早期是十分明显的。过了一些年后,这种极端的对立态度慢慢变得缓和了。现在这两种理论和学说在很大程度上被认为是相互补充的。形象地说,还原论意味着从上往下索,关注较低的层次;而整体论则是从下往上索,关注较高的层次。它们在任何科学的和满意的描述中都是相互补充的。非此即彼、各执一端的单一进路都有缺陷。可以说,现代系统思维已远远超越了还原论或整体论的单一思维模式,正是它们的互补,形成了现代系统思想的基础和系统科学的方法论基础。P. 萨普斯(Patrick Suppes)于1983年对此做了一种诗意的表达:“我从部分到整体来回跳着优美的舞蹈,在每一边我们都不会被抓到。舞蹈将永远进行下去。”^①系统科学及复杂性科学的任务,就是不断发现并编创这些舞蹈。我们认为,突现论应该是这种优美舞蹈的候选者之一。

▷▷ 2.2.3 跨学科研究的兴起

像还原论的思维方式在科学研究上必然导致分门别类的专门化研究——

① P. Suppes, *Reductionism, atomism and holism*. In *Parts and Wholes* (Proceedings of The International Workshop in Lund, Sweden). Vol. 1. Forskningsradslansnanden, Stockholm, 1983, pp. 134-140.

样,整体论的思维方式在科学研究上必然导致跨学科研究。20 世纪上半叶,影响系统运动产生的另一重要根源,是出现了一种越来越强的意识,即许多现象和问题已不能仅仅局限在单个学科中进行研究。这最终导致了交叉学科、横断学科等新兴学科的出现和跨学科研究的兴起。

跨学科研究作为系统科学的一个重要研究方法,我们将在第 5 章中做详细论述。这里仅从系统运动的产生根源的角度做一简要说明。随着科学的发展和思维方式的变革,人们越来越不满足于分门别类、单科独进的研究方式。这种态势开始时是采用“汇集”的方法进行多学科、并行不悖的研究方式。但后来人们很快发现,如果用系统的思想把被考察的对象(系统)作为一个整体来处理,所取得的效果将远比杂烩式的多学科汇集研究更为优越。这种现实以及伴随产生的各学科数学化的趋势,逐渐导致了多学科协同发展的交叉学科的出现。在这里,一个整体的复杂的研究对象不是被分解为单个的问题由单个的学科来解决,而是作为一个整体由不同学科来共同进行研究

正如本书 5.1.2 所要指出的那样,我们下一节所谈到的几次系统运动的浪潮,本质上就是跨学科研究运动的浪潮。比如,在系统运动开始的第一次浪潮中,一般系统论、控制论、信息论以及通讯科学、运筹学、组织科学、政策科学、计划科学、管理科学等都是跨学科研究的结果。这些跨学科领域的存在正是导向将系统视为跨越学科边界的认识的第一步,也是认识系统性概念的第一步。贝塔朗菲所构想的概念和理论框架之所以叫“一般系统论”(GST),它的主题是“对适用于一般系统的原理的表述和推导”,其意义就在于,他的理论与传统的专门学科不同,可以应用于许多研究领域。

跨学科研究之所以可能的依据和思想基础,是对描述不同对象系统之间的同构性(isomorphisms)的认识。传统上由于研究主题的不同而被人们分割的对象系统之间,存在着同构关系。所谓同构关系,简言之就是,不同的系统之间不仅在元素上、而且在关系或运算法则上存在着——对应的映射。一旦一种相应的同构性在两个或更多的领域建立起来,那么,在一个领域中发展起来的理论和方法,就很容易应用到相应的其他领域之中。

不同领域中同构性的发现,有助于一种新的关于系统思维方式的形成。

系统性类似变得越来越重要,至少是与事物性差异同样重要。此外,同构性的发现不仅具有理论上的意义,而且还有实践上的价值。比如,它有可能使一种科学方法从一个成熟的领域转移到另一个方法上还不太成熟的领域(方法的转移)。例如分析电路的一个很好的概念框架,通过建立同构性,可将之转移到力学、声学、电磁学和热学系统中。

同构性的建立还使人们有可能根据其他具有同构性的系统来直接研究某个系统。例如,对汽车、飞机、直升机或火箭的动力特征的实验研究,就可以根据这些人造客体的模型,以适当的规模在风洞中进行试验,而不是用这些物体本身来实验,这样通常会更加便利、廉价和安全。

整体论的系统观念,科学中跨学科领域的出现,对不同学科中同构性的存在和利用,使一些学者意识到,特定的概念、观念、原理和方法可以被应用于一般意义的系统,而不管它们的学科类别如何。这终于导致了一般系统的概念、理论及研究等的出现。

▷▷ 2.2.4 工程与管理需求的促进

系统运动的出现也与工程和管理领域在 20 世纪的发展需求有关。20 世纪初,在这两个领域运用系统思维和系统方法来解决实际问题已变得越来越重要。特别是由于军事后勤和资源管理的需要,第二次世界大战对系统思想在实践中的发展起了催化剂的作用。尽管那时一般系统思想在科学和实践中还不广为人知,但是其应用领域的性质促进了整体分析和定量分析的发展。

工程和管理的发展在某种程度上是相联系的。系统工程的兴起实际上与管理问题紧密相联。工程任务中的复杂性增加更需要管理的加强。这些要求在第二次世界大战期间迅猛增加,那时,复杂的军事问题进入了管理领域。因为,紧急的战略和战术决定必须快速做出,必须形成由数学家、工程学家和管理者组成的多学科的科学团队来分析有关的论题,例如最佳行程安排和资源分配、成本效益和风险分析、计划编制、预算等等。这些活动的结果就产生了侧重于处理战略性全局问题的“系统工程”和侧重于处理战术性具体问题的“运筹学”等新兴学科。也正是由于战争的推动,系统工程和运筹学在军事国防系统和工程管理中受到极大的重视,得到了迅速的发展。第二次世界大战后,与系统运动密切相关的系统分析也发展起来。

系统分析的目的是运用系统思维和方法(包括传承于运筹学的方法论工具)来分析在公司企业或公共组织中出现的各种复杂问题,为政策和决策的制定提供支持。

除军事工程与管理以外,民用工程与管理也推动了系统科学的发展。比如从电话网络到计算机设计和以计算机为基础的系统设计,这类工程均受到设计系统中迅速增长的复杂性的挑战,而求助于系统思想和系统方法。1930年美国无线电公司在发展与研究电视广播网时,就采用了系统方式(system approach)。30年代,美国贝尔电话公司在设计巨大工程时,感到固有的传统方法已不能满足要求,提出和使用系统概念、系统思想、系统方法这类术语。1940年,他们在安排微波通讯网时,创造并使用了系统工程学。

综上所述,系统运动的根源和系统科学的产生可归纳为如图2.3所示。^①

►► 2.3 系统科学的发展^②

系统科学、包括复杂系统科学产生半个多世纪以来,在系统运动的浪潮中,其发展势头强劲,发展速度迅猛,学术成就喜人。新的系统理论不断涌现,新的应用领域不断拓展,新的系统流派也不断问世。如何概括和总结系统运动的发展轨迹和系统科学的发展历程,不同学者有不同的认识路径和不同的概括方式。我们赞同诺贝尔奖获得者西蒙(Herbert A. Simon)教授及国内多数学者的观点,将系统科学和复杂性探索的发展历程概括为“三次兴趣波”或“三次浪潮”。^③

▷▷ 2.3.1 20世纪20—60年代:系统科学的形成和发展

作为系统科学意义上的现代系统理论,萌发于20世纪初,形成于20世

① G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 52.

② 本节涉及的许多理论概念和专业术语,在此只做历史概述,有关内容将在以后各章详细论述。

③ 西蒙(司马贺):《人工科学:复杂性面面观》,武夷山译,上海科技教育出版社2004年版,第157页。

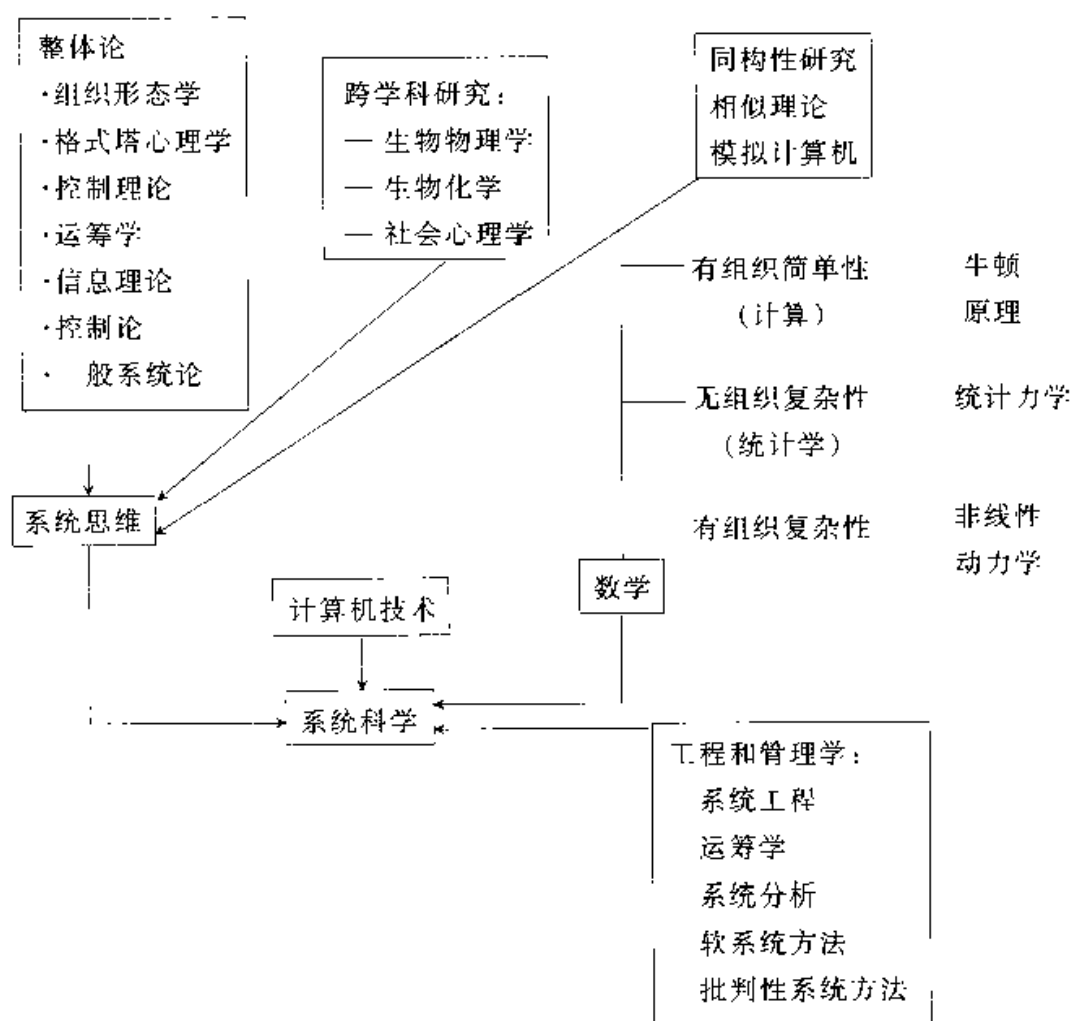


图 2.3 系统运动产生的主要根源

纪 30—40 年代,发展于 20 世纪 50—60 年代。其代表性的理论乃是一般系统理论、控制论、信息论等学科的创立和发展。它们的出现标志着系统科学已步入现代科学殿堂,登上人类文化的历史舞台。

1. 波格丹诺夫的一般系统理论

创立一般系统理论的主要代表人物有两个,就是波格丹诺夫和贝塔朗非。俄罗斯学者波格丹诺夫(А. А. Богданов)于 20 世纪 20 年代发表的《组织形态学》,越来越被人们誉为系统科学的开山之作。他提出的系统思想不仅在时间上要比贝塔朗非的“一般系统论”和维纳的“控制论”早 20 多年,而且更重要的是在内容上也具有开创性和独特性。由于当时苏俄的政治和意识形态等种种原因,波格丹诺夫的系统思想未能得到传播和肯定。现在,无论是俄罗斯国内的学者还是欧美的学者,都承认波格丹诺夫是先于

贝塔朗菲的现代系统科学的奠基者,并开始关注和研究他的系统思想。这样,现代系统科学产生的时间,就由原来通常所说的以贝塔朗菲的“一般系统论”为标志的20世纪40年代,提前到了以波格丹诺夫的“组织形态学”为标志的20世纪20年代。

波格丹诺夫于20世纪初叶在莫斯科大学执教期间,就开始创建并宣传关于组织的普遍规律的科学——组织形态学。波格丹诺夫从行为整体观念出发,力求以普遍认可的科学语言,克服学科之间的分裂,探索普适性的基础。这样,他把对普适性的组织原则总结为一门学科,看做是对整体组织起来的世界观的反应。组织形态学不是局限于某一领域内部的探索或者局限于某一原则的普适性,而是建立了运用于任意客体和独立于物质基础过程的一般图示,建立了各种不同类型和组织形式的组织形态学模式。波格丹诺夫认为,系统思想的最高境界应该是不仅表现为人类对自然环境的有意识的控制,而且表现为对社会环境有意识的控制。因为实践和理论的一切任务就是组织形态学问题,即关于将现实的和理想的状况更加明晰地组织成为某一整体的方式方法。^[1]

2. 贝塔朗菲的一般系统理论

美籍奥地利生物学家贝塔朗菲于1937年在芝加哥大学的一次哲学讨论会上第一次提出了一般系统论概念,但由于当时的压力而未发表。后来,他在1945年发表《关于一般系统论》一文,提出一般系统论的任务“乃是确立适用于系统的一般原则”,并对系统的共性做了一定的概括,如系统的整体性、关联性、动态性、有序性、终极性等等。1968年贝塔朗菲出版了《一般系统论:基础、发展和应用》,此书全面总结了他的研究工作,是说明其一般系统论思想、内容和理论框架的代表性著作。我们从这部著作中可以看到,贝塔朗菲的一般系



L. 贝塔朗菲(L. V. Bertalanffy
1907—1972)

[1] 参见 *Тектология——всеобщая организационная наука*. А. А. Богданов / В. В. Попков, Г. Д. Гловель, В. Д. Мехряков. Издательство «Финансы» Москва 2003.

统论的主要内容包括:系统的若干概念及初步的数学描述,看做物理系统的有机体,开放系统的模型,生物学中若干系统论问题,人类科学中的系统概念,心理学和精神病学中的一般系统论。

贝塔朗菲通过对各个学科领域提出的系统问题及处理这些问题的概念和方法进行概括,建立起一般系统理论的框架,其中心概念是系统,然后引申出描述系统的一些特有概念,如生长、竞争、整体、机构化、等终性(目的性)等等。因此可以把一般系统理论理解为关于任意系统研究的一种一般的理论与方法论。事实上,一般系统论就是关于系统的一般理论。它不是关于某类特殊系统的理论,而是适用于一切系统的普遍原理。简言之,一般系统理论依据“同构性”原理,研究的是系统的整体性特征和行为,而与系统的具体内容无关。

贝塔朗菲的一般系统论突出了四大观点。(1)整体观点,整体性表现在空间上,是系统具有区别于外部其他事物和内部组成成分的整体形态、特征和边界;表现在时间上,就是系统具有特定的整体存续和演化的过程。所以贝塔朗菲认为,一般系统论就是对整体以及整体性的科学探索,就是关于整体的一般科学。(2)有机观点,系统的整体性是由系统的有机性,即由系统内部诸因素之间以及系统与环境之间的有机联系来保证的。(3)动态观点,系统的有机联系性不是静态的,而是动态的。有机性和动态性反映了系统的不同侧面,动态性强调的是时间上的变化。(4)有序观点,系统的有机性所表现出来的结构、层次,以及系统的动态性所表现出来的渐进分异的方向性,都使系统具有有序性的特点。

贝塔朗菲不仅是一般系统论研究的发起者,而且还是系统运动的一个主要组织者。1954年,他与持有相同观点的另外三位著名学者,即经济学家包尔丁(K. Boulding)、生理学家杰拉德(R. Gerard)和数学生物学家拉波波特(A. Rapoport)共同发起成立了“一般系统研究会”(SGSR),这四位学者常被人们认为是系统运动之父。他们提出了系统科学研究的四个主要目标:(1)研究不同科学领域中概念、原理和方法的同构性,并致力于从一个领域向另一个领域移植;(2)鼓励在有关领域中进行模型化的研究与探索;(3)尽可能减少不同领域中的重复研究;(4)加强学者之间的交流与协调,促进科学的统一。这些纲领在今天看来都具有很大的现实意义。研究会每年组织召开一次年会,出版一本年刊,吸引了大批不同学科的科学家,在当

时学术界产生了很大影响,推动了轰轰烈烈的系统运动。^①

3. 控制论

与一般系统论差不多同时兴起的另一门系统科学就是控制论。其代表性人物也有两个,即奥多布莱扎和维纳。国内学术界一般认为,控制论的创始人是美国数学家维纳,以其1948年发表《控制论——关于在动物和机器中进行控制和通讯的科学》为控制论的肇始之作。事实上,早在1978年8月,在阿姆斯特丹召开的第四届国际控制论大会上,就通过了一项决议,承认控制论的诞生时间应从原来认定的1948年提前到1938年,以罗马尼亚学者奥多布莱扎于1938年在巴黎出版的第一部控制论方面的专著《协调心理学》为标志,正式确认了奥多布莱扎作为控制论的真正奠基者。

奥多布莱扎在《协调心理学》一书中阐明了控制论的9个原理,即可逆性原理、平衡性原理、协调/失调原理、等值原理、补偿原理、循环性原理、反作用原理、变换原理、终极原理。值得指出的是,维纳10年后的控制论所论述的只有一条反馈原理。且维纳“反馈原理”的内容跟奥氏的“可逆性原理”的说法,有相似甚至雷同之处。在建立控制论的基本宗旨方面,奥氏控制论的出发点是面对整个世界,他要处理的是整个人类的思维活动和心理活动,以求揭示出一些普遍规律。1978年奥多布莱扎逝世后一个月出版的《协调心理学与控制论》,是一本阐明奥氏广义控制论学说的论著。据学术界公允的评论,奥氏最后所阐述的思想可以说是他的广义控制论的最杰出的代表,而且在其深度与广度上,都比维纳的控制论观点要更加全面和更具前瞻性。

当然,这种比较并没有降低维纳控制论的历史贡献。维纳本人指出,应当把控制论核心观点的形成放在20世纪物理学革命的大背景下来考察。钱学森认为,控制论是20世纪继相对论和量子力学之后又一次科学革命。我们认为,从系统科学和复杂性探索的视角来看,控制论具有开创性的历史贡献。

首先,维纳控制论的最大特点,就是把通讯概念和控制概念联系在一起。其奠基之作的书名就把控制论明确界定为“关于在动物和机器中进行

^① G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 46.



维纳(N. Wiener 1894—1964)

控制和通讯的科学”。在此之前，“通讯”和“控制”这两个概念是互无联系、互不沟通的。“通讯”和“控制”的联盟打开了系统研究和复杂性研究的广阔天地，被英国著名的系统科学家 P. 切克兰德列为系统科学的重要原理之一。

其次，维纳的控制论提供了一套意义深远的概念，如反馈、调节、回路、因果性、目的性等等。这些概念今天看来十分普及，可在当时则是对传统思想的一次大冲击。众所周知，自 17 世纪西方科学兴起以来，科学研究的对象主要是客观世界的物质（实体）运动，而控制论和系统论第一个将研究对象由实体性转为关系性，建立了自己的方法，进行了成功的操作，并得到了其他学科广泛的认同。控制论在研究对象上发生的革命性转变，为系统科学与复杂性探索提供了新的科学理念和科学方法。

第三，维纳的控制论本身就蕴含着潜在的复杂性。系统间的信息关联及其控制是产生复杂性的一个重要根源。由于具有多个子系统组合的系统的大量出现，会使得这一复杂性变得日益突出，因此“通讯”与“控制”才成为系统复杂性研究的一条核心原理。另外，“目的”和“反馈”的观点也让因果关系变得复杂起来，从而开创了通往“互为因果”、尤其是“递归因果”的复杂道路。^①

一般系统论和控制论自创立之后就相互促进、相互发展。促进这一发展的重要人物有艾什比(Ross Ashby)等人。艾什比对控制论的各种论题的重要贡献是始终如一地把它们当作系统问题来阐明和处理。20 世纪 50 年代，艾什比发表了《大脑设计》，创立了生物控制论。他还提出了超稳定系统概念，特别强调“黑箱方法”。他提出了“必要的多样性原理”，加深了人们对通讯和控制共性的认识。

① 颜泽贤：《复杂性探索与控制论发展》，《自然辩证法研究》，2005 年第 6 期。

4. 信息论

信息论的创始人是美国数学家申农 (C. E. Shannon)。1948 年,在美国贝尔电话公司研究所工作的申农发表了《通讯的数学原理》,标志着信息论的诞生。



申农 (C. E. Shannon 1916—2001)

申农信息论形成的技术背景是通信工程,是一门研究存在于通信与控制系统中信息传递的共同规律,以及如何提高各传输系统的有效性和可靠性的通信理论。申农信息论提炼出了包括信源、信宿、信道的信号传输的普适模型,定义

了信息量,提出了信源编码定理等重要定理,为一般意义上的信息传输奠定了理论基础。

申农对于信息论的贡献可以归结为如下几点:

(1) 第一次从理论上阐明了通讯的基本问题,提出了通讯系统的一般模型;

(2) 提出了度量信息量的数学公式,即著名的申农信息熵公式:

$$H = -K \sum_{i=1}^n P(i) \log P(i)$$

(3) 初步解决了如何从信息接受端(信宿)提取由信息源发来的消息的技术性问题;提出了如何充分利用信道的信息容量,如何在有限的信道中以最大的速率传递最大的信息量的基本途径;初步解决了如何编、译码才能使信源的消息被充分表达、信道的容量被充分利用的问题。^①

关于信息论在系统科学中的地位问题,学界有不同的看法。我国学者通常把信息论与一般系统论和控制论并称为“老三论”,说明它们在系统科学中具有同等重要的地位。在西方学者中,有一种观点认为,信息论的地位并没那么高。由于它研究的是信号在噪声干扰条件下的传输问题,这显然是控制论要研究的一部分主要内容,因而信息论只能是控制论的一部分,不能与控制论相提并论。另外,“信息论”(theory of information)一词也容易产

^① 颜泽贤:《现代系统理论》,三联书店(香港)有限公司 1993 年版,第 20—21 页。

生误导作用,使人们把工程学科中的信号传输研究等同于与社会、组织、管理、认识、心理有广泛联系的信息研究,引起不必要的混乱。^①

20 世纪 60 年代,系统运动出现了一个短暂的低潮期。一般系统论发展缓慢,甚至出现了停滞局面,控制论也转向了工程技术层面,系统科学没有取得实质性的发展。相反倒是兴起了一股对系统思想的批评之风。这种沉闷的状态后来被许多醒悟的运筹学家所打破,他们发展了定性的软系统思维和方法。其中重要的代表人物有丘奇曼(C. West. Churchman)、阿可夫(Russell L. Ackoff)和切克兰德等人。丘奇曼于 20 世纪 60 年代晚期提出社会系统设计的思想和方法,认为人类有不同的认识体系,自然科学方法并不是我们进行管理的惟一方法。在社会系统设计中有必要重视研究社会成员和组织成员之间的价值体系、动机体系和利益体系的复杂性和系统性。丘奇曼的理论因此而获得了社会系统领域的诺贝尔提名奖。同时,他的思想也影响了阿可夫提出的互动设计和切克兰德的软系统方法。

▷▷ 2.3.2 20 世纪 70—80 年代:自组织理论的建立

20 世纪 70 年代,系统科学的发展步入第二个阶段——自组织理论阶段。关于自组织理论的一些基本问题,特别是自组织产生的条件、判据和机制等,我们将在第 9 章中做专章论述。本节仅对这一阶段自组织理论产生的历史线索及几种有代表性的自组织理论做一简要说明。

自组织现象普遍存在,自组织思想源远流长。由于自组织过程极其复杂,直到 20 世纪 70 年代,人们在系统科学第一阶段发展的基础上,才对自组织现象进行了比较深入的研究,并逐步创立了自组织理论。自组织理论的发展大致又经历了两个阶段,即不同学科的自组织理论建立和一般的自组织理论发展两个阶段。

1. 学科自组织理论的建立

20 世纪 60 年代以来,人们对自组织现象的研究开始始于各种不同的科学实验和科学理论,因而建立了一些不同学科的自组织理论。其中主要的有耗散结构理论、协同学、超循环理论等。

^① 朱志昌:《当代西方系统运动》,见许国志主编《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社 2000 年版,第 596 页。

早在1947年,艾什比就描述了神经系统的“自组织”特性。此后20年,H. 福莱斯特(Heinz von Foerster)等人一直致力于自组织系统的研究。福莱斯特可以说是力图以物理学的精确性来研究自组织现象的第一个重要人物,并且也是自组织现象研究的一个重要组织者。他在1960年出版的《论自组织系统及其环境》一书中,在申农信息论的基础上提出运用信息量(有序度)来做自组织的判据,并提出了“通过噪声而有序”(order from noise)的原理:“一个系统能达到高序状态,当且仅当系统最大可能无序度的相对增加大于它现时的实际无序度,因为这个条件下系统相对有序度增加了”。^①

耗散结构(dissipative structure)理论是比利时布鲁塞尔学派领导人,物理化学家普利高津于1969年在一次“理论物理与生物学”的国际会议上、针对非平衡统计物理学的发展而提出的。所谓耗散结构理论,是指一个开放系统(不管是力学的、物理的、化学的还是生物的系统)在达到远离平衡态的非线性区时,一旦系统的某个参量的变化达到一定的阈值,通过涨落,系统可能发生突变,即非平衡相变,由原来的无序的混乱状态转变到一种时间、空间或功能有序的新的状态。这就是“通过涨落而有序”(order through fluctuation)。这种有序状态需要不断地与外界交换物质和能量才能维持,并保持一定的稳定性。普利高津把这种在远离平衡的非线性区形成的新的稳定的有序结构,称之为耗散结构。而研究耗散结构的形成、稳定、演化及其他性质的理论就是耗散结构理论。耗散结构系统能够自行产生组织性和相干性的现象,被称做自组织现象。所以耗散结构理论又被称做非平衡系统的自组织理论。^②普利高津因耗散结构理论而获得1977年诺贝尔化学奖。



普利高津(Ilya. Prigogine
1917—2003)

耗散结构理论对自组织理论的主要贡献在于提出了“非平衡是有序之

① H. V. Foerster, "On Self-Organizing Systems and their Environments". in M. C. Yovites, S. Cameron (eds), *Self-Organizing Systems*, Oxford, London, New York: Pergamon Press, 1960, pp. 31-50.

② 顾泽贤:《耗散结构与系统演化》,福建人民出版社1987年版,第71页。

源”和“通过涨落而有序”这两个自组织产生的基本条件。普利高津采用了薛定谔最早提出的负熵流的概念,使得在不违背热力学第二定律的条件下,非平衡系统可以通过负熵流来减少总熵,达到一种新的稳定有序状态,即耗散结构状态。这就是普利高津所认为的“非平衡是有序之源”。因此,如果说经典热力学在本质上是一种“结构破毁”的理论,耗散结构理论在本质上就是一种“结构产生”的理论。另外,普利高津运用一个图示描述了涨落与系统的功能和结构之间的关系。如图 2.4 所示,随机的涨落可能引起系统功能的局部改变。在一定条件下,这种局部改变又会引起整个系统时空结构的改变。结构的改变又反过来决定未来涨落的范围。同时涨落具有两重性:对于平衡结构,涨落起一种消极作用,是一种破坏稳定有序的干扰;对于耗散结构,涨落则起一种积极的作用,是形成新的稳定有序的杠杆。耗散结构可以被认为是由于物质和能量交换而稳定化了的涨落。无规则的涨落形成有规则的结构,这就是“通过涨落而有序”。

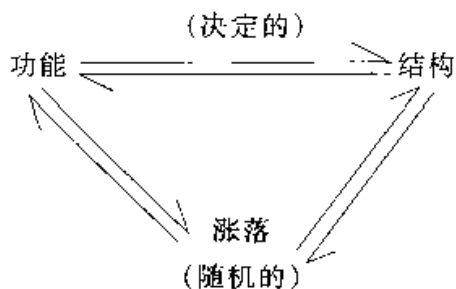


图 2.4 涨落、功能、结构之间的关系

协同学(synergetics)的创立者是联邦德国物理学家 H. 哈肯(Hermann Haken)。其主要思想源于哈肯对激光理论的研究。他发现诸多相互独立发光的原子及其所产生的光电场在一定的约束条件(泵浦所提供的一定能量供应)下,能产生出相位和方向都协调一致的单色光——激光。进而,哈肯把在激光研究中得到的一般原理,运用于解释其他自组织现象。他通过与其他物理学、生态学、经济学、社会学中的典型现象的类比分析,发现了完全不同的系统之间的惊人的类似性,认识到自组织系统从无序到有序的演化,不论它们属于自然系统或社会系统,都是大量子系统之间协同作用的结果,都可以用类似的理论方案和某几种数学模型进行处理,从而在 1970 年提出建立协同学的问题。1977 年出版了《协同学导论》一书,标志着协同

学的正式建立。

协同学是“一门关于协作的科学”，研究那些全然不同学科的极不相同类型的系统之间所普遍存在着的共同特点，即一个由大量子系统所组成的系统，在一定条件下，子系统之间如何通过非线性相互作用产生协同现象和相干效应，使系统形成有一定功能的自组织结构，从而在宏观上产生时间结构、空间结构或时空结构，出现新的有序状态。所以协同学是关于多组分系统如何通过子系统的协同行动而导致结构有序演化的一门自组织理论。



哈肯(Hermann Haken
1927—)

哈肯于1983年出版的《高等协同学》，解决了从无序到有序以及从有序到有序演化序列的统一描述，使协同学理论达到了完善的程度。在该书中，哈肯把协同学的基本原理概括为三个，即不稳定性原理、序参量原理和支配原理，认为这些原理构成了协同学的硬核。不稳定性是相对于稳定性而言的。以往的许多科学，如控制论，都是侧重于对稳定性问题的研究，而协同学以探寻系统结构有序演化为出发点，从一个全新的角度来考察不稳定性问题。它认为任何一种新结构的形成都意味着原先状态不再能够维持，即变成不稳定的。这样，不稳定性在结构有序演化中具有积极的建设性作用。协同学还认为，在临界点系统内部的各个子系统或诸参量中，存在两种变量，即快变量和慢变量。所谓支配原理，就是慢变量支配快变量而决定着系统的演化进程。慢变量和快变量各自都不能独立存在，慢变量使系统脱离旧结构，趋向新结构；而快变量又使系统在新结构上稳定下来。伴随着系统结构的有序演化，两类变量相互联系、相互制约，表现出一种协同运动。这种协同运动在宏观上则表现为系统的自组织运动。序参量是处理自组织问题的一般判据，是系统相变前后所发生的质的变化的突出标志。它表示着系统有序结构的类型，是所有子系统介入协同运动程度的集中体现。序参量是一种宏观参量，是描述系统宏观有序度或宏观模式的参量。序参量是子系统之间协同合作的产物、表征和度量。同时序参量又支配子系统的行为，主宰系统整体演化过程。

超循环(hypercycle)理论，其创立者是联邦德国生物物理化学家、诺贝尔奖获得者艾根(M. Eigen)。1979年艾根发表《超循环——自然的一个

自组织原理》一书,系统地阐述了超循环理论。超循环理论的中心思想是要说明在生命起源和发展的化学进化阶段与生物学进化阶段之间,有一个生物大分子自组织阶段,即从无生命到生命的进化阶段。在这个阶段中,形成了具有统一的遗传密码的原生细胞结构,这一自组织过程的机理是所谓“超循环”的组织形式。所以艾根等人认为,进化原理可以理解为分子水平上的自组织。



艾根(M. Eigen
1927—)

艾根从研究生命起源的阶段入手,在研究生物化学变化中,把循环反应网络分成三个等级,即反应循环、催化循环和超循环。不同等级的循环构成一个从低级到高级的循环反应网络谱系。所谓超循环,是催化功能的超循环,是经过循环联系把自催化连接起来的系统。艾根超循环理论的主要内容是对最高等级循环的理论处理,讨论它们在生物大分子自组织中的重要意义,以此探讨生命起源和进化问题。一般来说,超循环系统或超循环结构具有一些重要特征:能够通过循环联系为所有相关的大分子种提供稳定的和能控的共存,并可以使所有

的成员协调生长;超循环能和任何不属于该循环的单个复制单元进行竞争;超循环的内部联系与合作性质可以向最佳功能进化;超循环具有“一旦建立便永存下去”的选择机理。所有这些重要特征使超循环成为惟一一类自组织化学网络,也为识别超循环结构提供了一些重要标志。

超循环理论作为现代系统科学中的一个重要流派,它在许多方面丰富和发展了自组织理论。如果说协同学是从研究物理世界的自组织现象入手,然后把它推广到生物界和社会领域中的理论,那么,超循环理论则是直接从生物领域入手来研究自组织问题的。由于耗散结构理论和协同学都是以物理学为背景建立起来的,它的许多结论虽然能应用于生命系统,但局限性很大。艾根的创造性工作在于,他直接以生命系统演化为基础来建立自组织理论,用唯象的数学模型来描述生物大分子信息的起源和进化。

上述三大理论对自组织科学各有贡献。耗散结构理论阐明了自组织产生的外部与内部条件;协同学综合地考察了自组织发展的各种内部因素的作用,阐明了系统自组织的机制与内在动力;超循环理论则描述了自组织进

化的形式。

在自组织理论丛林中,除上述三个主要学科外,还有法国数学家托姆(Rene Thom)创立的“突变论”,它是研究自组织必经的“门槛”——突变的若干数学形式以及相变与临界现象的理论。该理论通过对状态变化与控制因素关系、突变发生过程的研究,刻画了在临界点上发生突变的系统演化行为。它推进和丰富了对自组织进程中结构与功能复杂性演化的研究,也推进了后来发展起来的对“分形”和“混沌”的研究。

2. 一般自组织理论的发展与应用

以上介绍表明,自20世纪60年代末以来,在物理学、化学、生物学、数学等经典科学领域,几乎同时从不同角度提出了系统自组织理论。不过值得注意的是,这些自组织理论的创立者,那时都各自埋头于自己本专业的研究,把它看做是物理化学理论(普利高津)、激光理论(哈肯)、生命起源理论(艾根)等来进行研究和接受诺贝尔奖,都没有自觉地涉及到自组织的一般理论,尽管系统自组织理论的核心已经呈现出来,并且某些概念都是他们共同拥有的,如“序”、“有序结构”、“涨落”、“分叉”、“非平衡态”、“选择”、“进化”等等。关于这一点,哈肯说得很清楚:“从后见之明来看,激光及其理论的确是自组织的一个很好的例子,只是当时我没有意识到这一点”。^①

但是,历史发展进入20世纪70年代以后,整个世界、特别是欧洲与北美人文社会的氛围发生了极大的变化,战争问题、生态危机问题、妇女问题和种族歧视问题、教育与文化问题等引发全球性运动与反思,一个寻找科学新进路、新规范与社会新组织的热潮兴起。在这种背景下,上面所说的不同学科领域的自组织理论,便开始整合成一个普遍的一般自组织理论。

1980年,美国学者E. 詹奇(Erich Jantsch)出版了《自组织的宇宙》一书。该书运用耗散结构理论、超循环理论和协同学等自组织理论的最新成果,结合过程哲学、系统哲学、东方传统哲学乃至佛教的宗教哲学思想,广泛涉猎从宇宙之初到精神现象、从自然演化到文化进步、从量子跃迁到社会动荡、从物理节律到全息学说乃至天人感应,从技术应用到发展战略以至伦

①: Kron, W., Küppers, G. & Novotny, H. (eds): *Self-organization: Portrait of a Scientific Revolution*. Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 6. 参见 <http://WWW.unikk.ch/course/seiten/lesson4.1.htm>. p. 8.

理、道德、艺术、管理和创造性学说等等领域,首次提出了一种从宇宙演化、生物进化到社会文化进化和精神发展的广义综合进化论——自组织进化论。詹奇的自组织进化论被普利高津誉为“自组织范式的催化剂”。可见无论从问题涉及的范围,还是从自组织范式的角度,詹奇的《自组织的宇宙》已有一般自组织理论的品位了。^①

美国系统哲学家拉兹洛(Ervin Laszlo)20世纪80年代也开始从综合的角度研究广义进化问题。他认为,当各门学科的自组织理论产生后,人们对从宇宙到文化的所有进化现象做详尽考察的条件已经成熟了。拉兹洛强调,一种新范式正在从许多科学领域中涌现出来,从而导致以变化、非决定论、非平衡的新观念取代较早出现的机械决定论和静态平衡观念。拉兹洛所指的进化,不仅包含生物界变化的形式和变化的动力学,而且也同样包含宇宙变化的形式和变化的动力学。按其新的含义,进化不仅仅指生物物种的进化,而且指在我们认识到的宇宙范围内出现、存在、变化或消失了的所有事物的进化。这是一种“广义综合”,是“一般的进化理论”。^②

与此同时,许多学科自组织理论的创立者也开始将自己的理论、观点和方法进行提升,并扩展运用到其他的领域。普利高津所领导的布鲁塞尔学派明确表示,他们所反叛的是传统物理学家对世界的经典认识观点。因为无数的科学发现使得人们认识到发生在自然界中的许许多多的基本过程是不可逆的、随机的,那些描述基本相互作用的决定性和可逆性的定律,不可能告诉人们自然界的全部真相。而且研究发现,在远离平衡态的情况下,分子之间可以互相传递信息,这样对处于远离平衡态的世界进行研究,就可以跨越自然科学的范围而进入人文科学的领域。所以,普利高津不仅将他的理论运用于经济学、生态学、社会,甚至还运用于股票市场、交通运输、城市的发展以及肿瘤动力学。哈肯于1981年写了《大自然的奥秘》一书,将他的协同学理论推广运用于生物进化论、个体发生学、经济学、政治科学以及科学进化。艾根也开始将他的超循环理论应用于经济学、生态学甚至审美

① 参见 Erich Jantsch, *The self-organizing universe, Scientific and Human Implication of the Emerging Paradigm of Evolution*. New York: Pergamon Press, 1980. 中译本见埃里克·詹奇《自组织的宇宙观》,曾国屏等译,中国社会科学出版社1992年版。

② Ervin Laszlo, *Evolution — The Grand Synthesis*, 1986. 中译本见《进化——广义综合理论》,冈家胤译,社会科学文献出版社1988年版。

学等等。

现在看来,20世纪70年代和80年代的自组织系统理论的研究,一方面是建立在扎实的科学理论和科学实验的基础之上,另一方面,在建立普遍理论及其广泛应用的过程中,又有某种发展的趋势。当然,其中有些结论显然只是通过隐喻与类比方法得出,尚未能建立有效地解决问题的科学模型和数学模型。现在,在系统科学的发展中,系统自组织理论和复杂适应系统理论正在合流,在新的一轮系统科学和复杂系统科学的发展中,自组织理论将进一步得到深入的研究和发展。

▷▷ 2.3.3 20世纪80年代以来:复杂系统科学的兴起

系统运动发展的第三个阶段是复杂系统科学的兴起。伴随着系统科学的发展,其研究对象越来越转向整体地研究自然界和社会中的复杂性问题 and 复杂系统。由于世界中广泛存在着复杂系统和复杂现象,因而探索复杂性,揭示复杂系统的结构、功能、规律和演化机制等,已成为现代系统科学研究的主要目标和发展方向。于是,进入80年代以来,各种复杂性理论相继产生。事实上,上述耗散结构理论、协同学、超循环理论等,其研究对象也都是复杂系统,故它们也属于复杂系统理论,不过主要是表现为自组织性的一类复杂系统理论。本节介绍的混沌理论、分形理论、复杂适应系统理论等,是现代较有影响的几种复杂系统理论,它们在探索复杂系统的复杂性和规律性方面,取得了引人注目的成就。

混沌理论(chaology)是研究混沌的特征、实质、发生机制以及如何描述、控制和利用混沌的一门科学。我们知道,耗散结构理论和协同学等着重研究了系统从无序到有序的演化方向。但是,当有序结构一旦形成之后,系统又将向何处去呢?研究表明,混沌(chaos)乃是有序系统演化的一个新的方向。

1963年,美国麻省理工学院的气象学家洛伦兹(E. N. Lorenz)提出了第一个关于大气运动中湍流出现的简化描述,拉开了对混沌进行研究的序幕。近年来,越来越多的学科开始把兴趣转向对混沌的研究。尤其是混沌动力学的兴起,使人们对混沌的认识大大推进了一步,发现一个远离平衡态的开放系统,在一定条件下不仅可以从无序走向有序,而且也可以从有序走向混沌。

遗憾的是,混沌作为一个新颖而重要的概念,迄今还没有一个普遍接受的定义。最早在混沌研究文献中引进 Chaos 一词的李天岩和约克(J. York)并未明确给出混沌的定义。不过,从其《周期3 蕴含混沌》一文看,他们试图用混沌来表征确定论系统所表现出来的“令人惊奇的复杂动力学行为”^①。哈肯在《协同学导论》中指出:“我们定义混沌性为来源于决定性方程的无规运动。”^②中国学者郝柏林持与哈肯相近的观点,认为“混沌决不是简单的无序,而更像是具备周期性和其他明显对称性特征的有序态……混沌是确定论系统的内在随机性”^③。研究表明,混沌具有一系列基本特征,如内随机性、对初值的敏感性即所谓“蝴蝶效应”、无序中的有序性和普适性等。

目前对混沌现象的研究已涉及到数学、物理学、力学、天文学、气象学、生态学、生理学,乃至社会学、经济学等多个学科领域。它可以被认为是一个大宝库,无论从哲学上、科学上、方法论上,还是从实用上,都很有价值。

混沌理论是一门综合性很强的复杂系统理论,它在系统思想、系统原理和系统方法等方面,都程度不同地影响到现代系统科学。特别是在系统演化中的有序与无序、简单与复杂、确定性与随机性等方面揭示了许多深刻的思想,极大地丰富和发展了现代系统科学。其他的系统理论,如一般系统论、耗散结构理论、协同学、突变论、超循环理论等,它们所描述的是一幅系统从无序到有序、从一种有序到另一种有序的演化图景。这就让人们形成某种片面见解,仿佛世界上一切系统不论条件如何,都是沿着这一条单行道在演化着,同时把有序理解为有组织、有秩序的进化过程,而把无序视为无组织、混乱和退化的代名词。混沌理论的研究从根本上动摇了这种观念。它首先使人们认识到,现时世界还存在另外一种演化方向,即从通常理解的“有序”向通常理解的“无序”的演化。混沌来自有序,又可以产生新的有序;有序来自混沌,又可以产生混沌。以往我们对有序、无序的理解或多或少有些绝对化。有序不是绝对的有序,其中也包含有“无序”的种子,包含有产生混沌的条件和根据;混沌也不是绝对的无序,更不是单纯的杂乱,它

① T. Y. Li, J. A. York, “Period 3 Implies Chaos”, *American Mathematical Monthly*, p. 82 (1975).

② 哈肯:《协同学导论》,徐锡申等译,原子能出版社1984年版,第403页。

③ 郝柏林:《自然界中的有序和混沌》,见《百科知识》1984年第1期。

包含有复杂的有序因素。因此,有序并不存在于无序化过程之外,而“有序化”的过程,还是对无序化过程的组织和控制。

以往的科学研究表明,确定性方程得出确定性的结果,随机性方程则得出统计性结论。混沌研究则在更高程度上将确定性与随机性、决定论与非决定论统一起来。如上所述,所谓混沌,就是确定性方程的不确定结果,是一种内在的随机性,这大大深化了我们对系统不确定性的认识。因此,在混沌理论中,牛顿力学方程和统计力学方法、线性随机性方程和非线性确定论方程、周期解和混沌解可以有机地结合起来,从而达到确定性和随机性、决定论和非决定论高度的内在统一。^①

分形(fractal)与分维(fractal dimension)是近年来发展起来的一门新兴学科。虽然它是数学的一个分支,但它研究的是自然界中常见的、变幻莫测的、不稳定的、非常复杂而不规则的普遍现象,因而也是现代复杂系统科学的一个重要组成部分。

分形理论的创始者是美籍法国数学家蒙德布罗(B. Mandelbrot)。他的专著《分形——形、机遇和维数》于1975年出版,标志着分形理论的产生。所谓分形,蒙德布罗于1986年给出过一个明确的定义:其组成部分与整体以某种方式相似的“形”,叫做分形。即分形是指一类极其破碎而复杂、但有其自相似性的体系。显然,蒙德布罗的分形概念,其内涵已包含着形态或结构,即把在形态或结构上存在自相似性的几何对象称为分形,故可以叫做“分形几何学”。随着“分形”概念向其他学科领域的渗透,以及其他学科、尤其是现代系统理论对“分形”的影响,在自相似性的概念中逐渐加入了“功能”和“信息”的意义。即人们发现,不仅形态或结构具有自相似性,而且功能和信息也具有自相似性。因此,一般把在形态(结构)、功能和信息等方面具有自相似性的研究对象统称为分形。这样定义的分形可称之为“广义分形”,其内涵大大超过蒙德布罗所定义的分形几何。

研究表明,分形具有如下一些基本特征:第一,分形具有不均匀性的层次结构,它不能用长度、面积、体积这类规则几何对象的特征量来描述,分形的特征量是分数维数。第二,分形是一种无标度对象,在不同的尺度上观察它,看到的是相同的现象,即分形具有自相似性。第三,分形中的自相似性

① 颜泽贤:《现代系统理论》,三联书店(香港)1993版,第129—130页。

既可以是绝对相同,亦可以是统计意义上的相似,且以后者为主。同时,相似性还有层次、级别上的差异。第四,分形既可以是几何立体,也可以是由“功能”或“信息”等构造的数理模型。

分维即分数维数,是定量描写分形的重要参数。如上所述,分形不能用长度、面积、体积这类规则几何对象的特征量来描述,分形的特征量是分数维数。所以分维成为测度用其他方法不能明确定义的一些性质的手段,是对分形对象内部不均匀性、层次结构性的整体数量特征的刻画,是对分形复杂性程度的度量。必须指出,客体的维数与客体所存在的空间的维数是两个不同的概念。我们所讨论的分维是指前者,即客体自身存在形式的维数,而客体所存在的空间的维数还是经典维数。

自然界中的分形是多种多样的,因此描写它们特征的分维也有多种定义和计算方法。现在已经研究的就有豪斯道夫维数、相似维数、容量维数、信息维数、关系维数、李亚普诺夫(Lyapunov)维数、模糊维数等等。

分形概念与分形思想在许多方面丰富和发展了现代系统科学,同时也对系统科学的研究提出了许多新的课题和拓展的生长点。比如分形与系统相似性问题。分形理论从一个全新的角度反应了对象系统内部存在着的相似性,即自相似性。而且这些对象系统又是变幻莫测、极不规则的现象,用一般科学理论很难精确描述,甚至无能为力。而分形则通过自相似性从不规则性中显示出规则性,成为描述和计算这些不规则性和断裂形状的有效方法。分形对自相似性的研究表明,自相似性是一种跨越不同尺度的对称性,许多现象从正态分布的角度产生了偏差,而从尺度变换的角度却给出了对称,因而它揭示出世界往往以有规则的不规则性表现出来。又比如,分形理论为人们认识世界提供了一种新的思维方法。对于那些大量存在的极不规则的复杂现象,分形理论并不是把它简化和抽象为简单的规则形状来进行处理,而是承认破碎与复杂,这就意味着分形否定了光滑,从而也就否定了微分。分形把解析学的最大武器微分给放弃了,这在科学史和科学方法论上恐怕是一个划时代的事件。分形方法对复杂客体的研究,是通过局部去揭示整体的新的本质联系和运动规律的,这就使人们摆脱了传统的简单性原则方法的束缚。

现在国外的分形研究十分活跃,理论的发展和应用的拓展均十分迅速。很多国际著名的期刊上经常有涉及分形理论与应用的论文发表。近年来召

开过多次有关分形的国际学术会议,并出版了多册会议文集和多本专著。现在,人们把研究分形及其性质和应用的科学称为“分形理论”。分形理论的诞生与发展,深化了人类对客观世界的认识,诱发了一些新的学科生长点。它不仅对自然科学的各个领域,而且对社会科学等诸多领域都有很大影响。不同领域现象之间的类似性,科学上的许多难题,都可以通过分形理论得到解释。反过来,这些领域又向分形理论提出了许多新课题,使之得到不断发展。“分形”,已成为当代科学的热门话题之一。正如美国物理学家约翰·惠勒(John Wheeler)所说:“在将来,一个人如果不熟悉分形,他就不能被认为是科学上的文化人”。^①

自组织临界性(self-organized criticality)由美国布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室的物理学家贝克(Per Bak)和唐超(Chao Tang)等人于1987年提出,是关于具有时空自由度的复杂动力学系统的时空演化特征的一个概念。他们通过著名的沙堆模型说明自组织临界性的存在,并进而认为,像地壳变化、火山爆发、太阳耀斑、生态进化、股票市场、金融危机、恐龙灭绝和人类大脑等等这样大而复杂的相互作用系统,在时间和空间的不同刻度上,会朝着一种临界状态不断地自组织。在这种临界状态下,小事件会导致一场大爆发。所以自组织临界性是指:存在复杂的动力学系统,这些系统能够自发演化到“自组织临界状态”,达到这样的状态以后,系统的时空动力学行为不再具有特征时间和特征空间尺度,因而表现出覆盖整个系统的满足幂律分布的时空关联。自组织临界性可表示为如图2.5所示。^②

自组织临界状态是动力学系统的一个吸引子,它既区别于有序吸引子,也区别于混沌吸引子。它在空间尺度分布上表现为分形结构,在时间尺度分布上表现为 $1/f$ 噪声。所谓分形结构,如上所述,它表现了空间内在的标度不变性。所谓 $1/f$ 噪声,是一种由各种持续时间特征所构成的极不稳定的信号叠加的结果,它表示一个系统当前的动态特征受过去事件的强烈影响。可见分形与 $1/f$ 噪声具有共同的根源——自组织临界性。

① 刘华杰:《分形艺术》,湖南科学技术出版社1998年版。

② 郭爱克:《脑的复杂性与创造性思维》,载于成思危主编《复杂性探索》,民主与建设出版社1999年版,第159—161页。

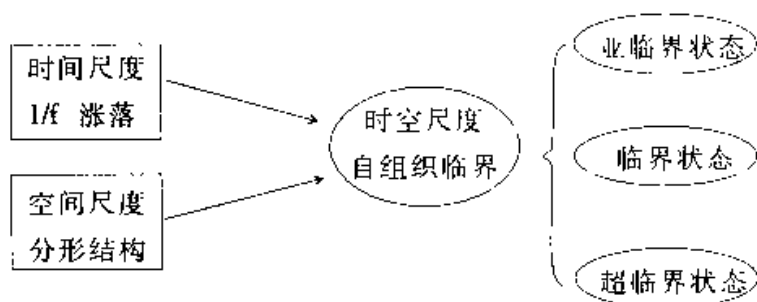


图 2.5 自组织临界性

自组织临界状态由于具有敏感性,小事件能引发任何规模的连锁反应,包括灾难性的大事件。但同时由于它具有鲁棒性(Robustness),即有某种强健性、坚韧性和自主性,系统的整体不受破坏。这样,自组织临界性理论就给我们提供了一种观察系统细微的、分散的变化同大规模变动之间联系的方法论原则。

复杂适应系统(Complex Adaptive Systems,简称CAS)理论是复杂系统科学研究中的热门课题,近年来取得了较大的理论成果。学术界公认,“复杂适应系统”这一概念的提出并建立了比较成熟的理论的人,应是美国圣菲(Santa Fe)研究所指导委员会主席之一、遗传算法的发明人约翰·H. 霍兰(John H. Holland)。1994年,在圣菲成立10周年所举行的乌拉姆系列讲座的首次报告会上,霍兰提出了关于复杂适应系统的比较完整的理论,随后以《隐秩序:适应性造就复杂性》一书出版。与此同时,圣菲也确立了以“整合论题:复杂适应系统的共同特征”为主题的工作纲领,并于会后出版了文集《复杂性:隐喻、模型与实在》。圣菲创始人、诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼(M. Gell-Mann)、圣菲研究所所长考温(George A. Cowan)等人均在该文集中发表文章论述了复杂适应系统问题。盖尔曼在题为《复杂适应系统》一文中,指出复杂适应系统是宇宙的一类特殊系统,它包含地球生命出现前的导致生命的前生命化学反应、生命进化本身、个体生命有机体和生存系统的功能、哺乳动物免疫系统以及人类大脑的运作、人类文化的进化、计算机硬件和软件的功能、各种经济系统的进化、组织与社团的进化等等多种多样的过程。考温则对复杂适应系统的概念做了一个界定:“复杂系统包含了许多相对独立的部分,它们高度地相互联系和相互作用着。它们大部分是这样的组成部分,这些组成部分要求有再生真正复杂性、自组织、复制、学习

和适应系统的功能”。^①

事实上,20多年来,圣菲研究所在复杂性探索方面,取得了一系列重要成果。首先,他们研究了复杂适应系统一系列新奇性的特点,如突现、集体行为、混沌边缘、自发组织、隐秩序、虚实世界等,认为复杂性、适应性、开放性的交互作用,使复杂适应系统在演化过程中呈现出复杂而有规律的特点。其次,指明了复杂适应系统研究的内容非常广阔,不仅在分子生物学、非线性科学、认知科学等领域开始了成效卓著的研究,而且在神经生物学、脑科学、宇宙学、生态学、免疫系统、人工生命等领域也展现了光明的前景。

霍兰分5个逻辑步骤展开他对复杂适应系统理论的研究:第一步,确定7个基本概念:聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型和积木。前4个概念描述行为主体的特性,后3个概念刻画主体与环境相互作用中的机制。第二步,建立适应性主体即个体演化模型,包括建立执行系统的模型、确立信用分派的机制和提供规则发现的手段。第三步,建立宏观演化模型,即所谓回声模型的基本框架。第四步,计算机模拟。即用计算机来模拟复杂适应系统的复杂现象和演化形态。第五步,建立复杂适应系统的一般理论。该理论得到了学术界的高度评价。盖尔曼称“霍兰为读者讲述了21世纪科学中最激动人心的部分”,侯世达(Douglas Hofstadter)说“《隐秩序》是一部里程碑式的杰作,为研究复杂性如何突现和适应设定了一个路标,所有试图理解现在称做复杂性之大综合的人们,将长期把它作为指路灯塔”,等等。

盖尔曼也提出了自己对复杂适应系统的研究进路。他认为,复杂适应系统是通过一个回路来进行运作的。这个回路由可变图式、偶然环境、表型结果以及选择压力对图式竞争所起作用的反馈构成。它们不断地探测出大量的可能性,开辟出高层次的复杂性与新型的复杂适应系统。英国学者拉尔夫·斯泰西(Ralph D. Stacey)运用现代复杂系统理论的最新成果研究组织行为学和经济管理问题,从一个新的角度阐发了复杂适应系统理论。他界定了复杂适应系统、行为主体、显性模式、隐性模式等基本概念;归纳了复杂适应系统的一些基本特性,如不断突现隐秩序,行为主体的非线性相互作用,复杂适应系统以发现、选择、行为、学习为过程和运行模式;阐述了复杂

^① George Cowan et al. *Complexity: Metaphors, Models and Reality*, Addison-Wesley publishing Company, 1994, p. 2.

适应系统在混沌边缘的辩证演化过程;将复杂适应系统理论应用于组织管理和经济管理等等。斯泰西提供了一种用复杂性科学理论和方法来审视组织管理的全新理念,使组织管理和经济管理理论步入了一个新的阶段。^①

复杂适应系统理论的提出,对复杂性研究无疑是一大贡献,它为人们认识和研究复杂系统提供了一种新的思路和新的方法。由于其思想新颖和富有启发,该理论提出不久,即在学术界产生了较大影响。众多的学者从不同角度和不同学科出发来研究复杂适应系统,从理论和应用两个层面探讨复杂系统的行为规律、深层机制和应用前景。

►► 2.4 复杂系统科学研究的流派、进路与展望

上节我们主要从纵向的角度考察了系统运动的历史过程,本节我们则主要从横向的角度来分析系统科学的发展状况。依据本书“注重前沿”的编写宗旨,我们着重探讨系统科学发展的前沿——复杂系统科学研究的分支、流派、进路与发展趋势问题。

▷▷ 2.4.1 复杂系统科学研究的主要流派

对于当今尚在蓬勃发展、方兴未艾的复杂系统科学研究进行概括,不同研究者可以从不同角度加以认识。美国乔治·梅森大学(George Mason University)的沃菲尔德(John Warfield)认为,在美国就存在系统动力学学派、适应性系统学派、混沌学派、结构基础学派等。我国戴汝为认为,国际上研究复杂性科学,按其所用术语可以概括为三个方面:一是欧洲的普利高津、哈肯等人开创的远离平衡态的开放系统;二是美国圣菲研究所以复杂适应系统为标志的工作;三是中国的钱学森提出的以开放的复杂巨系统为主线的研究。林益等则归纳出西方有20种不同的系统观和39个系统学派。^②我们认为,复杂系统科学研究主要有以下几种理论或学派。

① 斯泰西:《组织中的复杂性与创造性》,宋学锋、曹庆仁译,四川人民出版社2000年版。

② 林益等:《系统科学研究的过去、现在与未来》,见《农业系统科学与综合研究》,2000,16[3],第161—167页。

1. 一般系统论学派。贝塔朗菲创立的一般系统论不仅开启了现代系统科学,而且也开启了对系统复杂性的研究。贝塔朗菲在《一般系统论》中指出:“我们被迫在一切知识领域运用‘整体’或‘系统’概念来处理复杂性问题”。^①他力图从对立、斗争和一致性中发现系统演化的机制,从系统内部说明何以能够出现由简单到复杂、由低序到高序的演化。圣菲研究所第一任所长考温认为,复杂性研究作为一门科学,以及对复杂性的现代兴趣的唤醒,肇始于贝塔朗菲的工作。也就是说,贝塔朗菲创立的一般系统论标志着复杂性科学的诞生。首先,从一般系统论开始,“系统”、“整体”和“整体性”成为科学研究的对象。其次,一般系统论是第一个反对还原论的科学研究纲领,其方法论是非还原论的。20世纪40年代先后出现的系统论、控制论、运筹学、信息论、博弈论和系统工程等新学科,是人类为对付复杂性而制订的第一批理论和技术。它们为复杂性研究锻造了第一批科学概念,如系统、组织、信息、通讯、反馈、控制、功能、模型、信息熵、整体性、目的性、秩序性等,初步验证了系统方法处理复杂性的有效性,为复杂性科学的正式问世做好了准备。现在国际学术界仍有一批学者在沿着贝塔朗菲创立的研究纲领和路径进行对复杂性的探索,如国际一般系统研究会。

2. 自组织理论学派。耗散结构理论、协同学等自组织理论所研究的系统具有两个新特点:一是元素数量极大,致使单一中央控制成为不可能;二是元素具有自身的、另一层次的、独立的运动,使整个系统不可避免地具有统计性和随机性。自组织理论还讨论了涨落、分叉、相变等新的概念,对系统复杂性的理解深入了一大步。所以普利高津在其《探索复杂性》一书中指出:“自组织现象是作为一个崭新的科学范式出现的,它使人们可以设想出复杂性如何在自然中出现,以及可在何种程度上被加以探索研究。”^②他还指出,我们正在目睹一种新科学的诞生,这种科学不再局限于理想化和简单化情形,而是反映现实世界的复杂性。另外,协同学、突变论、超循环论、自创生等自组织理论都从不同角度研究了复杂性问题。所以,自组织理论仍是探索系统复杂性的核心理论。目前,全世界有5所致力于复杂系统研

① 贝塔朗菲:《一般系统论:基础、发展和应用》,林康义、魏宏森等译,清华大学出版社1987年版,第2页。

② 尼科里斯、普利高津:《探索复杂性》,罗久里、陈奎宇译,四川教育出版社1986年版,中文版序言。

究的机构以普利高津的名字命名。该学派的基本观点请参阅本书第9章《系统自组织理论》。

3. 复杂适应系统学派。主要是指美国圣菲研究所(SFI)的工作,其宗旨是开展跨学科、跨领域的复杂性研究。如前所述,他们把经济、生态、免疫系统、胚胎、神经系统以及计算机网络等称为复杂适应系统,认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为。他们提出了“适应性主体”、“可变图式”、“混沌边缘”、“适应性景观”等概念,建立了复杂适应系统的整体多样性和演化模型。复杂适应系统理论以一种跨学科的视角和独到的方法揭示复杂性产生的机制和复杂系统进化的动因。目前这一学派在欧美影响很大,发展很快。圣菲研究所已成为美国第五大研究所,世界复杂性研究的基地,许多有关复杂性的前沿研究成果不断从这里涌现。1997年,美国学者沃尔德罗普(Michell Waldrop)的以叙述圣菲研究所探索复杂性的畅销书《复杂》在我国翻译出版,接着圣菲成员的许多著作被相继介绍到我国。如霍兰的《涌现》、《隐秩序》,盖尔曼的《夸克与美洲豹》,考夫曼(Stuart Kauffman)的《宇宙为家》、《科学新领域的探索》等均被翻译成中文在中国出版,大大推进了我国学术界对复杂适应系统理论的认识和研究。该学派的基本观点请参阅本书第10章《复杂适应系统理论》。

4. 系统进化控制论学派。早在20世纪60年代,艾什比就指出:对于那些以复杂著称而其复杂性不容忽视的系统,控制论给出了一种新的科学方法。“在研究复杂性的种种方法中,控制论是一种杰出的方法。”^①事实上,自维纳把控制论定义为关于“动物和机器中控制和通讯的科学”、艾什比建立控制论神经模型以来,控制论的视野就不仅仅局限在工程控制领域。其中一个重要的趋势就是在复杂性研究中与系统的行为、人的认识甚至人的心理问题联系起来。例如,美国一个控制论研究小组,其创始人W. 鲍威斯(William T. Powers)提出的“感知控制论”,就是一种对认知的多层级集中控制观。^②另外,比利时布鲁塞尔自由大学学者F. 海里津(F. Heylighen)与美国学者V. 图琴(V. Turchin)以及C. 约翰逊(C. Joslyn)等三人共同

① W. Ross Ashby. *An Introduction to Cybernetics*, London, 1957, p. 5.

② William T. Powers, *Behavior: The Control of Perception*, Aldine de Gruyter, 1973, Fifth Printing, 1997.

组织了一个“控制论原理研究计划”,^①以图琴的元系统跃迁理论为核心,提出建立一种控制论进化系统哲学或世界观,认为从许多特别意义上说,控制论可以一般地理解为研究复杂系统组织的抽象原则。因此,感知控制论和元系统跃迁理论从层次控制、目的性调节、进化选择等方面揭示了系统复杂性及其进化的机制,为复杂性研究提供了一种一般性的原则和方法。该学派的基本观点请参阅本书第8章《系统进化控制论》。

5. 复杂范式学派。法国学者埃德加·莫兰(E. Morin)在批判“简化范式”的同时,提出了“复杂范式”的概念和理论。他把经典科学特有的理解方式的原则称之为“简化范式”,认为其特点就是普遍性的原则、还原的原则和分离的原则。而在复杂范式下,“系统”不是整体的一个主导词,而只是复杂性的一个基础词。莫兰为我们指出了通向“复杂性的挑战”的13条途径或原则,例如“普遍性的原则是有效的,但又是不够的”;“承认和融入时间的不可逆性的原则”;“组织的不可回避性的原则”;“复杂因果性的原则”等。莫兰将系统作为一个新的认识范式,并对系统与整体的关系做了区分,认为“我们应该把系统的概念建立在整体的非集权式的和非等级性的观念的基础上,建立在多样性统一的复杂观念的基础上,并向多方面整体开放。”^②可见,莫兰的复杂范式要建立的仍然是对系统整体与部分的复杂关系的一种新的理解方式。但正如莫兰所言,至今仍没有现成的“复杂范式”。莫兰的复杂范式主要从社会科学和哲学的层面探讨复杂性问题,在法国及欧洲有较大的影响。

6. 系统管理学派。现代组织管理大体上可以分为三个流派:传统管理学派、行为学派和系统管理学派。系统管理学派认为前两种学派都是只注意了组织管理的局部问题而忽视了整体。而复杂系统管理的涵义,一是把管理对象看做一个整体的复杂系统;二是将复杂性理论和方法运用于管理实践和管理科学之中。因此,它们强调应该把组织管理视为一个整体,一个具有自适应和自调节功能的开放系统。可以运用自组织理论和复杂性研究的成果建立系统模型,探索组织整体的自学习、自适应和自发展的机制和方

① <http://pcp.vub.ac.be> 或 <http://pcp.lanl.gov>。

② 埃德加·莫兰:《复杂思想:自觉的科学》,陈一壮译,北京大学出版社2001年版,第212页。

法,理解组织行为的“突现”。目前复杂系统管理方面的著作很多,应用的方法主要有:硬系统方法、软系统方法、批判性系统思想和各种系统组织管理模型。^①将复杂性理论引入管理,将进一步引导管理范式的变革,同时,在管理实践中,将提高决策的有效性,促进研究组织的演化、管理的变化、合作与竞争、技术创新等。该学派的基本观点请参阅本书第11、12章的内容。

7. 开放复杂巨系统学派。20世纪80年代中期,差不多在与美国圣菲研究所开展复杂性研究的同时,在钱学森的指导和参与下,我国对社会经济系统等复杂系统进行了研究,提炼与总结出开放的复杂巨系统概念,以及处理这类系统的方法论,即从定性到定量的综合集成法,并于1990年初正式发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》。我国经过十多年的努力,开始在研究的前沿提出自己独到性的理论。这是中国开展系统科学与系统工程研究及其应用的标志性成果。钱学森等认为,简单大系统可用控制论的方法,简单巨系统可用统计物理的方法,这些方法还基本上属于还原论的范畴,但开放的复杂巨系统,不能用还原论的方法和由其派生的方法,而应该运用“以人为主、人机结合、从定性到定量的综合集成。集大成得智慧,以此来解决复杂问题。”^②综合集成方法既是一种研究方法,也是一种技术,还可以作为一项综合集成工程。这里包括了感性的、理性的、经验的、科学的、定性和定量知识的综合集成。

这7个理论或学派以各自独特的视角对系统复杂性的不同层面做了深入的研究。当然还有其他一些理论或学派,或者我们没有介绍,或者尚在发展之中,留待以后归纳总结。

▷▷ 2.4.2 复杂系统科学研究的进路

从以上对目前复杂系统研究主要学派和理论的概括,我们发现,不同学派的研究者对复杂性研究所采取的进路、研究方法以及形成的核心概念和理论都存在较大差异。我们认为,在今天,不同层面和角度的复杂系统科学研究都具有其独特的价值和意义。虽然学派众多,但归纳起来大致有如下

① Michael C. Jackson, *Systems Approaches to Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.

② 许国志主编:《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社2000年版,第654页。

四种进路。

1. 具体科学的研究进路。在各门具体科学的层面或特定的研究领域中的复杂性研究,不仅是科学研究的前沿和重大课题,也是复杂性研究的一个重要阵地。如美国《科学》(Science)杂志于1999年发表的题为“复杂系统”的专辑,就邀请了物理、化学、生物、经济、生态环境、神经科学等方面的8位科学家,撰写他们所从事的领域中关于复杂系统的研究进展,其核心概念和方法都具有较强的专业性。特别是进化生物学、统计物理学、经济学等学科的研究对象都是典型的复杂系统,具有显著的复杂性。因此,这个进路的复杂性研究可以为人们理解复杂性提供丰富的案例资源,同时,也可各门自然科学的研究发掘新的更为有效的研究方法手段。

2. 跨学科的研究进路。以跨学科、交叉性的研究进路,探索不同复杂系统之间的共性,建构系统科学和复杂性科学的一般性理论,提供一种系统思维的新范式。这个层面的研究不仅是复杂性研究的核心目标和宗旨,而且代表了整个科学发展的一个重要趋势。正如美国圣菲研究所所长所指出的,对复杂系统做完整而准确的描述是整个科学面临的重大挑战。复杂性科学是整个科学发展的前沿,不是哪一门具体科学的前沿。因此,系统科学和复杂性研究需要不同学科之间的深入对话与合作。复杂性研究的显著的跨学科性体现了现代科学技术发展的综合趋势,揭示了不同科学领域的同构性,反映了科学思维范式的突破性变革。

就跨学科具体的研究进路而言,系统思维、系统理论和系统实践之间的相互促进有着不同的发展循环过程。简而言之,可以概括为三个发展环。第一发展环:系统思维经过形式化后产生系统理论,系统理论又促进系统思维。所谓系统思维,作为一种思想框架,它以理念的形态、整体的方式指导人们处理复杂的认识对象。而系统理论就是清晰的、准确的、形式化和体系化了的系统思维。第二发展环:系统思维经过形式化后产生系统理论,系统理论又被应用于其他学科发展具体科学层面的系统理论,最终这些理论又促进了系统思维和系统科学的发展。第三发展环:系统思维通过将其理念和方法论应用于现实世界的有关领域,这种系统实践有助于提高该领域问题解决的有效性,反过来又促进系统思维和系统科学的发展。^①

^① Robert L. Flood and Ewart R. Carson, *Dealing with Complexity*. Plenum Press, 1993, p. 4.

研究的一般性理论提供了独特的资源。^①

▷▷ 2.4.3 系统科学发展的趋势与展望

系统科学,尤其是复杂系统科学,仍是一个纷繁复杂、充满挑战和机会的领域。到目前为止,它仍未达到可与传统科学,如物理学、化学、经济学等相比的成熟程度,一个系统科学研究共同纲领或统一范式远未形成。另外,系统科学的发展又代表了当代科学技术发展的新潮流,因此,从总体上认识系统科学的发展趋势,对于学习和研究系统科学十分重要。

1. 系统科学的学科发展。现代科学技术在高度综合的大趋势下,导致了系统科学学科群的产生和迅速发展。系统科学研究中一个不可忽视的问题是,要对自身目前学科建设的基本问题作出较为明确的界说,然后确定其发展的重点和主攻方向。美国学者 G. 克勒尔认为,系统科学的发展有四个关键性问题需要解决,即复杂性、不确定性、可靠性和有用性。一方面,这四个问题本身需要做深入的研究,另一方面,这四者之间的内在关系又非常复杂,它们构成了系统科学基础研究的关键问题,并成为系统科学发展的突破口。^②

我们认为,系统科学需要突破与完善的不仅限于上述问题,比如还有信息的本质问题,模糊系统以及非线性混沌系统问题,各种目的定向系统,特别是自组织、自保护、自繁殖和自创生系统的研究问题,相关领域具体的系统问题(如元胞自动机、神经网络系统、基于分形几何的系统、心理系统的意识与审美问题等等)。其中我们认为有几个重要问题值得一提。

复杂性研究,将成为系统科学发展的前沿课题和主导趋势。众所周知,系统科学自诞生之日起,就视复杂性研究为己任。从贝塔朗菲的“被迫处理复杂性”到普利高津“探索复杂性”口号的提出,再到圣非研究所要建立“复杂系统的一元化理论”,都把复杂性问题作为明确的研究目标和主要任务。在探索复杂性的道路上,他们都不同程度地取得了一定的成就,但离建立所谓“复杂系统一元化理论”还相距甚远,以致不得不发出“从复杂性到

① 以上参见颜泽贤、范冬萍《复杂性探索:理论与价值》,见《新世纪新思维》,中国财政经济出版社 2004 年版。

② G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 213.

困惑”的感叹。究其原因,在系统科学的基础理论、应用理论和工程技术等逐步转向复杂性问题后,理论建设和应用实践的强烈需求与系统科学的现状之间形成巨大差距,使系统科学界普遍感到困惑,急盼新的突破,关键是基础理论的突破。^①

系统,尤其是复杂系统动力和动力学问题也是系统科学理论发展的核心问题。贝塔朗非早就指出过,“组织和组织的力还没有弄清楚”。迄今为止的系统科学理论虽然都各自从不同的方面描述了系统的特征,并且都不同程度地涉及到系统的生成和演化问题。但是,一方面,多数是从静态静力学的角度来考察系统,另一方面,各理论之间也还没有统一起来。其根本问题之一正在于缺乏描述系统生成和演化的统一动力学理论,特别是复杂系统动力学理论。因此,深入地研究这一问题是系统科学的发展方向和理论研究的前沿。

科学发展的实践一再表明,科学的革命由概念的革命来推动,以概念的创新为先导。没有重大基本概念的突破、深化和创新,就不可能有理论的更新和发展。系统科学更是如此,系统思维的创新,系统理论的发展,首先在于系统概念的突破。一方面是对现有一些重要的基本概念,如自组织(Self-organization)、复杂性(Complexity)、适应性(Adaptive)、目的性(Teleonomy)、行动者(Agents)、突现(Emergence)等概念及其关系做深入的研究,另一方面是在广泛的科学考察中,提出更基本、覆盖面更广的基元性概念。比如“突现”这一概念就是系统科学发展的核心概念之一,圣菲学者就把研究突现作为“圣菲理念”之一。事实上,半个多世纪以来的系统科学发展史表明,系统科学的每一重要进展都是对描述突现性的某种突破。所以要克服系统科学、特别是复杂系统科学研究面临的难题,就要求深入研究突现问题。只有当人们能够对突现问题做出严谨而系统的科学解释,说明突现的内在机理,发现关于突现的基本规律,创造一套描述突现的方法,才能进一步推动系统科学特别是复杂系统科学的发展。

2. 系统科学的体系建构。在数十年的系统运动中,形成了形形色色的系统流派和系统观点,可以说系统科学的有关材料已经不少,主要理论已经提出,系统科学作为一大科学门类已经形成。现在的主要问题是体系尚不

① 苗东升:《系统科学的难题与突破点》,见《科技导报》2000年第7期。

完善,作为一门严格意义上的形式化、公理化的科学尚未形成。甚至对于系统科学究竟应包括哪些内容,如何建立一个统一的系统科学学科,都还存在多种不同的意见和看法。当前,尽管系统科学的某些具体学科在数学上已相当成熟,但作为实现一般原理、原则、概念的形式化、公理化的目标,即从各种类型的具体系统中抽象出共同本质性的东西并加以形式化、公理化,建立起系统科学的统一的一般理论,也许还有一段时间。对此,圣菲成员、计算机仿真专家卡斯蒂(John L. Casti)曾说:“复杂系统的理论家们正处在与伽利略时代的物理学家们相近的位置。正是伽利略的努力,为牛顿建立简单系统的理论铺平了道路。不幸的是,复杂系统理论仍在等待它的牛顿。”^①因此,人们期待着一个成熟、统一的系统科学体系的产生和逐步完善;期待着系统科学尽快形成自己的理论体系,以满足自身建设的要求和科学一体化的需要;期待着系统科学和复杂性科学的“牛顿”尽早出现。

3. 系统科学的哲学提升。随着系统运动的展开,系统思想的传播,系统科学的确立和应用,其巨大的理论价值和现实意义已成为国际学界的共识。系统科学不仅是未来科学发展的一个重要趋势,而且也是哲学、特别是科技哲学领域一个崭新的、具有挑战性的前沿课题。

事实上,在系统科学的发展中,人们普遍注意到这样两方面的理论问题:一是要对系统科学的哲学基础做出明确的解答,并进行科学的哲学提升。二是要探讨系统科学的方法和方法论。总之,需要建立与当代系统科学和复杂性研究成果相适应的系统科学哲学。

系统科学有其自身的研究对象、概念范畴、原理和规律,应当深入研究系统科学的这些理论问题及其哲学升华。包括对一些基本概念的梳理和逻辑分析,然后概括出核心的系统思想和系统方法。如突现与层次的思想、信息与控制的思想、进化与自组织思想、综合与分析方法、功能与黑箱方法、模型与隐喻方法等,并对当前主要的系统科学理论和复杂性理论进行研究,特别是从跨学科的进路和科技哲学的层面对系统科学的一些重大理论问题,如复杂性产生的机制和原理等进行哲学概括和提升,探讨系统科学和复杂系统科学的认识论和方法论意义,探索超越还原方法论的复杂性思维新范

^① 约翰·卡斯蒂:《虚实世界》,王千祥等译,上海科技教育出版社1998年版,序。

式和系统科学方法论,从一个新的视角对一些哲学问题,如行动者与对象的关系、整体与部分的关系、模型与现实的关系、隐喻与突现的解释模型等进行研究。我们相信,系统科学哲学理论将深刻改变世界的科学图景,带来科学思维范式的突破性变革。

4. 系统科学的实践与应用。系统科学改变了人类的思维方式,为人们研究现代社会、经济和各个科学领域中的系统复杂性问题提供了新思路、新途径。系统科学的发展方向将向社会、经济、生态、管理、生命、精神等领域扩展。

人类已经进入信息社会,信息社会是一个与工业社会完全不同的社会形态。各种信息的数量极大丰富,全球传播瞬息万变,复杂性水平精彩纷呈,混乱程度错综复杂。人类社会活动也构成了一个庞大的复杂系统,不同的领域交错互融。这些问题的处理和解决越来越依赖于新思维、新方法。系统科学在人类社会实践中的应用,将使人们能够自如地应付复杂多变的社会实践活动。人们的社会、经济生活和行为方式也将随着系统科学的发展而不断变化。信息社会的实质是组织复杂性问题,组织复杂性向人们提出的严峻挑战是:系统的复杂性程度超过了人们的信息处理能力。应对这种挑战,系统科学将继续成为主要的智力资源。即每一个社会组织都必须按照系统思想的要求进行运作。在信息社会,组织别无选择,只有适应不断变化的环境。为了生存,它们必须调整自己的结构、过程以及技术,以使自己能够适应这个新的环境。因此,组织决策不仅将更加复杂,而且要求更快更频繁。一个具有自我发展能力的社会组织,必须能够根据环境变化建立相关系统模型,并运用这些模型进行预测,及时做出正确决策,实现组织目标动态优化。这意味着在信息社会,对系统科学专门人才的需求必然会大大增加。

探索系统思想和系统方法与管理学的结合并应用于实际管理,也是系统科学应用的一个重要领域。如研究管理的系统进路,组织控制理论,复杂性管理理论等,不仅创新和发展了管理理论,而且为有效地解决一些复杂的管理现实问题提供了科学的理论和方法。

系统科学在实践中的应用,还要关注和解决当今人类普遍关心的一系列发展中的难题,如可持续发展问题,人口、资源、环境、生态问题,包括政治、经济、科技、文化在内的全球化问题,信息化、数字化、网络化生存问题,

全球产业结构调整问题,以及化解金融风险问题等等。这些问题的解决也体现了系统科学的社会功能。

第二编 一般系统论

第 3 章

系统概念

系统概念,在历史上是系统运动的产物。由于系统科学有许多不同的学派,因而也有不同的系统概念。本章主要综合介绍系统科学界对系统概念的一些基本共识及其主要分歧。

▶▶ 3.1 系统及其元素与结构

▷▷ 3.1.1 系统的定义

我们从带有共识意义的系统的常识概念出发来讨论系统的定义。《韦伯新世界辞典》(Webster's New World Dictionary)称:“系统是相互关系、相互联系着而形成一个统一体或一个组织整体的事物的集合分布。”^①(system is a set arrangement of things so related or connected as to form a unity or organic whole.)不同的学派可以强调系统定义的不同方面,给出不同的解释。

首先,实在论学派强调系统定义的“事物”(things)方面,强调系统是物质系统,由相互联系的物质客体所组成。例如,科学唯物主义者、系统科学家邦格(Mario Bunge)认为“任一物质的客体都或者是一个系统,或者是系统的一个组成部分”,不但物理和化学系统是物质的,有机体和社会系统也是物质的。^②霍尔(Hall)与法根(Fagan)则写道:“一个系统是客体与客体

① 转引自 G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 4.

② Mario Bunge, *Scientific Materialism*. D. Reidel Publishing Company, chap 2, 1981.

之间相互关系的集合。”^①

其次,反实在论学派强调系统是人们建构与“安排”(arrangement)的。例如,艾什比认为“把系统看做是一个现实的客体是多么地不恰当啊,”“系统并不是指一件东西,而是举出一批变量,这批变量是可以更改的,实验者最起码的工作就是改动这一批变量系统……这事归根到底还得由我们自己来决定”。^②沿着这个反实在的建构主义路线,系统科学家和生物学家罗森(R. Rosen)强调,系统是认知地为人们所建构的实体,不仅形式系统是人们运用符号和语法规则建构起来的,自然系统也是人们依“经验的单元”选择建构起来的“某种假设或模型”。^③而布莱恩·简斯(Brian Gaines)则给出了一个最典型的建构主义系统定义:“系统就是那些我们想识别其为系统的东西”,^④我们不能期望发现一个系统,是我们创造和建构了一个系统,同样的经验可以建构出许多不同的系统。^⑤在后面探讨系统方法和系统模型的章节中,我们将会继续讨论这个问题。

再次,形式主义学派则特别注意用形式的方法、数学的方法来定义系统。他们只关心系统的符号形式,不关心其内容。他们提出了系统的一个很好的形式定义:设 T 为元素 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 诸集的族,即

$$T = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

而它们的笛卡儿积 R 为:

$$R = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n = \times_{i=1}^n X_i$$

则系统 S 定义为 $S = (T, R)$ ^⑥

关于这个形式定义,下面我们还要讨论。

撇开客观性还是主观性、实在论还是反实在论、形式主义还是建构主义

① Hall, A. D. and Fagan, R. E (1956). "Definition of System", *General Systems* (Yearbook of the Advancement of General Systems Theory) 1:pp. 18-28.

② W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall LTD., 1957, pp. 40-41, 227.

③ R. Rosen, *Anticipatory Systems*, Pergamon Press, p. 47.

④ B. R. Gaines, "General Systems Research: Quo Vadis". *General Systems Yearbook*, vol. 24, 1979, pp. 1-9.

⑤ G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic/Plenum Publisher, 2001, pp. 21-24.

⑥ Mesarovic, M. D. (ed.) [1964]. *Views of General Systems Theory*. New York: John Wiley.

这些问题不谈,从系统的常识概念来看,也从系统科学最新的发展来看,以上这些定义至少有三个共同特征:

1. 系统中存在着能相互区别的实体(entities)叫做元素。
2. 元素之间存在着某种关系或关系的网络。
3. 这些关系对于产生出一个与周围环境区别开来的新的组织整体(organized whole)、新的系统分析层次是充分的。

在过去的系统科学教材甚至专著中,对于系统的一般定义只强调1、2两点,但从系统科学近期的发展看,第3点是很重要的。它蕴示了系统具有某种复杂的动态整体性,系统与它的元素相比,具有某种突现性质。这一特征预示着后面各章需要展开的内容,它以一个胚芽的形态蕴涵于系统的一般定义之中。

因此,在讨论一般系统时,我们可以在某种程度上返回到一般系统论创始人L. V. 贝塔朗菲的系统定义。他将系统定义为“处于相互关系中并与环境相互联系(从而形成组织整体)的元素的集合”^①,任何元素,只要它们处于某种相互联系中,并形成组织整体,它就构成一个系统。例如氢原子与氧原子相互联系组成水分子系统,诸位同学与诸位老师,并不是互不相关偶然碰在一起的,而是在教与学的联系中形成整体,构成教学系统。而一旦形成系统,实践上就可能有一个如何优化、改进这个系统的问题。又如,在特定的知识领域里,各种经验事实、概念、原理、定理构成一个理论系统,相关人员以特定的工作方法、工作原理、工作规则、工作程序和社会关系的总和构成特定的组织与管理系统。当然世界上有各种各样的系统,简单的和复杂的,有组织的和相对无组织的,固定的和活动的。在一极上,有元素之间的相互关系被固定起来的系统,即静态平衡系统(如一只钟表);在另一极上,有几乎毫无约束的元素相互关系系统(如理想气体分子运动系统)。本书所要研究的系统是介乎这两极之间的系统,即将变化着的相互作用和固定着的相互作用结合起来的系统。例如,一个细胞就是这样的系统。

① L. 贝塔朗菲:《一般系统论》,秋田、袁嘉新译,社会科学文献出版社1987年版,第46页。其中“并与环境处于相互关系中”一语是根据贝塔朗菲《一般系统论的历史与现状》一文中所述的系统定义加上去的。该文见《科学学译文集》1980年版,第315页。

▷▷ 3.1.2 系统的组成元素(element)

所谓系统的组成就是系统的各个部分的集合,其中每一个部分都叫做系统的元素。例如一个细胞的组成是细胞膜、细胞质和细胞核的集合,其中细胞膜、细胞质和细胞核都是细胞的组成元素,它们是相互区别、可分辨的。

一个苯分子的组成是六个碳原子和六个氢原子,在其中的每一个碳原子和氢原子都是苯的组成元素。一个大脑的组成包括大脑皮质、大脑髓质、侧脑室等等,大脑皮质的组成又包括听觉分析器、视觉分析器、皮肤分析器等等,而后者的组成则是各种神经元的集合。总之,从人们一定的观点来看,只要是系统的组成部分,它就是系统的元素。不过我们应该注意,系统的组成或组成元素,有许多不同的层次。例如,一片森林是一个自然系统,它的第一层组成是其中的各种植物和动物的群体;而植物群体又是由各种植物个体组成的,所以这片森林的第二层组成是各种植物个体。而植物个体又可分析为根、茎、叶、花、果实等,它们严格说来,都是这片森林的组成元素。但对于我们了解这片森林的特定现象来说,我们所关心的是这片森林的特定层次的组成,例如各种植物群体、动物群体等,而不关心诸如某棵树木上的叶子的细胞,尽管它也是森林的组成元素。这种观点叫做“粗粒化”(coarse graining)。^①就好比在电脑上看一幅照片,由于受像素的限制,当你不断放大这张照片时,最后看到一些粗糙的颗粒,颗粒里面是不能区分也不必区分的。当然,我们研究一个系统必须做细致的分析,分析它由哪些元素组成,但分析必须有个立足点和出发点。又如,中子、质子甚至中微子是原子核的组成元素,因而也是原子的组成元素,但当我们研究原子结构而不研究核结构时,我们只把原子核和电子当做组成元素,无需再细分。这样来划分的自然系统组成,称为系统的相对组成或系统在某一层次上的组成。因此,当我们要确定一个系统时,就需要首先确定观察者和观察的角度。这是系统和元素概念的主观性。纯粹客观元素是没有的,它们是与观察者相关的,与观察者的目的和观察者选择相关。从这一方面来看,建构论的系统定义是有道理的。在一个卖猪肉的档口,小贩们将一头猪划分为几个部分出售,与一

^① M. 盖尔曼:《夸克与美洲豹》,杨建邺、李湘莲等译,湖南科学技术出版社2001年版,第30页。

个动物解剖学家划分的部分与元素是大不一样的,这是观察、变量与系统的主观性。只有在确定了观察者、观察角度和观察参量之后,我们才要特别注意观察的客观性,系统与元素特征的客观性。在这一方面,实在论者邦格是对的。因此,上面所说的实在论的系统观和反实在论的建构主义系统观都各有各的道理,不可全盘否定对方的观点。所以,我们不妨将物质、能量、信息和观察看做是世界的四大要素,看做系统的四个方面。

客观地说,在所有的不同层次的组成中,对于研究系统的某一特定过程和特定领域来说,我们需要连续研究多级组成。但是这些组成中有一个层次的组成特别重要,我们将它称为基本组成。例如在化学系统中我们需要连续研究物体、分子团、分子、原子、外层电子等层次,其中原子、分子是基本的组成。在生命系统中,我们需要连续研究群体、个体、组织或器官、细胞、亚细胞等层次,其中细胞是基本组成。再如大脑系统或神经系统中,神经元是基本组成。计算机系统的硬件中,门电路是基本组成,等等。基本组成对系统起决定作用,因而对它的分析往往成为分析该系统的逻辑起点。一般我们讲系统的组成,主要讲的就是这种基本组成,有时人们称它为系统的“内在实体”或系统的“物质基础”。它的发现和认识对于研究该系统的学科来说具有划时代的意义。道尔顿发现了化学原子,开辟了化学的新时代,经典热力学时代是随着分子运动论开始的,电子的发现开辟了微观物理学的新时代,基因的发现开始了遗传学的新时代,DNA的发现开辟了分子生物学的时代等等,就是很好的证明。当然我们这样讨论问题已经暗含了某种特定的观察者的角度。如果换一个角度,那些“基本组成”或“内在实体”就会发生变化,这又是一个主客观关系问题。

系统的元素通常是用名词或名词短语表示的某种自然现象、社会现象或思维现象,这种现象是观察者们一致认为存在的,或者将会存在的,或者它被假定为对获得某种洞察是有价值的。系统中的元素常被认为是具有行动能力的,这样它便有一种可改变的属性。系统的元素通常是通过它的性质来进行描述的,如颜色、质地、大小、数量、强度、形状或能力等等,而这些性质又是随时间的变化而变化的。关于这种动态的分析,我们将在本章第3节中进行讨论。

▷▷ 3.1.3 元素之间的关系或系统结构

系统内部诸元素不是毫无关系地偶然地堆积在一起的,而是有着紧密

的相互联系和相互作用,否则它就不是一个系统。而所谓元素之间的相互作用是什么意思呢?就是彼此影响、相互约束或相互控制,即它们彼此改变对方的状态或状态空间,改变对方的行为路线或行为方式。(关于这些概念,将在本章第3节讨论。)例如,太阳作用于地球是什么意思?就是太阳改变了地球的状态,使地球有了一个圆周运动(否则就处于等速直线运动状态,飞向茫茫的太空),使地球万物得以生长等等。如果一个系统不改变另一个元素的状态,就根本谈不上这个元素对另一个元素有什么作用。如果我站在这里上课不至少改变诸位的视网膜的状态,耳膜的状态,我谈得上对你们有什么作用吗?甚至对你们说来连我的存在本身都是个问题。因此元素的相互作用可以用元素的相互改变来描述。

设一系统有 n 个元素,任一元素用 $X_i (i=1,2,\cdots,n)$ 来表示。又假定 Q_i 为 X_i 的某种量度,它的改变量为 $\frac{\Delta Q_i}{\Delta t}$ 或 $\frac{dQ_i}{dt}$,如果这种改变量是连续的,于是系统元素之间的相互作用便可以用一个微分方程组来表示,即:

$$\frac{dQ_i}{dt} = f_i(Q_1, Q_2, \cdots, Q_n) \quad i=1,2,\cdots,n$$

这就是贝塔朗菲首先提出来的系统方程组。这个方程组表明:系统中任何一元素的状态变化($\frac{dQ_i}{dt}$)是所有元素的函数或结果,而任一元素性状的改变(方程右边 Q_i 的变化)又引起所有其他元素性状的变化($\frac{dQ_j}{dt}$ 的变化)。这个方程所表达的元素相互作用和相互作用网络,与一般的单向因果关系的表达式有很大的不同。第一,这里表达的关系,不仅包括 Q_i 作用于 Q_j 的关系,即 Q_i 仅是原因、 Q_j 仅是结果的关系,而且包括 Q_i 作用于 Q_i 、而 Q_j 又反作用于 Q_i 的环形因果关系,这种环形因果关系,称为反馈(Feedback)。例如,生态系统中的捕食者与被捕食者就是这样一种关系,假定由于植被的增加,一种小的食草动物群体成指数增长,这就使吃食这种小动物的食肉动物物种群体数量也成指数增长,结果食草动物因被吃食而大量减少。食草动物群体总数增长通过它与食肉动物的关系反馈作用到自身。第二,这里表达的不是只抽出少数几个因素进行考察的简化因果关系,而是表现了元素之间普遍的相互作用和多样性联系的网络,是元素之间的系统性、有机性和复杂性。

系统诸元素之间的相互作用或相互改变是怎样实现的呢？现代自然科学告诉我们，包括观察者在内，自然界任何系统都有物质、能量、信息三个方面，元素之间的相互作用通常都是通过交换物质、能量或者信息来实现的，它们可以表现为物质、能量、信息的流。例如，根据量子电动力学，我们知道，物体之间的电磁相互作用是通过交换光子而实现的。根据原子核物理学，我们知道，原子核里面质子和中子的相互作用是通过交换介子而实现的。而有一种物理学理论认为，前面所说的太阳与地球之间的引力相互作用是通过交换引力子实现的。太阳促进地球万物的生长，则是通过能流来实现的。至于比较复杂的自然系统内部诸元素的相互作用，其中信息的交换或信息流起着极为重要的作用。例如人体的大脑对身体其他各个部分的相互作用就是主要通过信息交换而实现的，它通过传感神经输入身体各部分的信息，又通过输出神经输出控制信息，支配身体各个部分的行为状态，使人体内部各器官之间联系成为一个复杂的有机整体。

什么是系统的结构呢？所谓系统的结构，就是系统诸元素之间相互关系、相互作用的总和，它构成了系统内部相对稳定的组织形式和结合方式，即我们上面所说的组织整体。例如，原子核结构就是质子和中子之间依强相互作用和电磁相互作用而形成的结合方式。原子结构就是电子与原子核之间相互关系和相互作用的总和而形成的组织形式。分子结构就是分子内部诸原子之间通过价键的相互作用而结成的原子之间的组合方式。化学结构理论的创始人之一，俄国化学家布特列洛夫（A. M. Butalilov, 1828—1886）就说过：“我把化学原子化合力的相互作用和分布，或诸原子相互结合的方式，叫做化学结构”。至于说到社会的经济结构，它就是生产关系的总和。马克思说：“人们在自己生活的社会生产中发生一定的、必然的、不以他们的意志为转移的关系，即同他们的物质生产力的一定发展阶段相适合的生产关系。这些生产关系的总和构成社会的经济结构”。^①

在复杂系统理论中，系统科学家们常常使用“模式”（pattern）和构型（configuration）的概念来说明系统的一种整体或宏观的时空结构。美国新英格兰复杂系统研究所（New England Complex Systems Institute-NECSI）的杨尼尔·巴杨（Yaneer Bar-Yan）是这样定义模式的，他说：“模式是一组关系

^① 《马克思恩格斯选集》第2卷，人民出版社1995年6月第2版，第32页。

的集合,这组关系满足系统的观察的某种要求或满足系统聚集(collection)的某种要求,它是系统整体的而不是它的组成部分的性质。”^①常见的模式是系统空间上的重复结构,如花布上每隔一段空间距离即出现同样的花样;时间上的重复结构,可由季节的变化来例示;时间与空间的结构,如龙卷风,就有某种漏斗形的旋转气流的模式持续存在。用一个模板或原型来复制某种东西,其中反复出现的形式也叫模式。总之,宏观上或整体上有某种形式或样态重复持续出现,我们不必每一次都重新由头至尾对它的组成与结构进行描述,用一个简略的高层次的名称来指称它,叫做模式或构型。它是系统的相互关系的总和,或结构的一个子集,或一种具体形式。

从元素之间的相互作用和相互改变构成由元素之间物质、能量、信息的交换与流通来实现某种结构、模式或构型来看,元素之间相互作用的总和与结构,可以运用网络模型、流图、反馈回路、递归运算以及微分方程等工具来加以表述。

为什么系统元素之间相互关系的总和会构成系统结构即组织整体呢?这里存在一种约束机制(mechanism of constraint)。

元素之间的相互作用和相互改变状态,对元素起到一种限制和约束的作用。它限制了系统的变化,限制了元素的自由度和随机性,把它们约束在一定的时间、空间和形态范围里,从而形成某种稳定的结构模式与构型,并与其他系统或环境区别开来。例如,行星按照自身的惯性,倾向于保持自身的运动状态,并有若干平动、转动和振动的自由度。但太阳与行星之间的相互作用,改变了行星本来的行为路线,限制了它的平动自由度、转动自由度,将它们约束在一定的空间范围,从而形成相对稳定的太阳系有序结构。又如,在原子核中,质子带正电,按其本性相互排斥,四散逃逸,但由于存在着核力的相互作用,约束了它们的行动,避免了它们的逃逸,而形成了原子核结构。再如,在原子内和在原子间的电子,如果不受原子核的作用,就处于自由状态,叫做自由电子。由于原子核的作用以及电子之间的相互作用,就限制了电子的自由状态,使它成为束缚电子,约束在一定的原子系统或分子系统的空间范围,从而形成了原子结构或分子结构。在社会系统的模型中,

^① Yaneer Bar-Yan, "Guide to Complex Systems". Concept Map-pattern, <http://necsi.org/guiden/>.

假定组成社会的个人是自利的,如果不存在社会有序关系的约束,自利的个人为实现自己利益的最大化,倾向于相互掠夺、相互侵犯而无所不为。正是经济关系、商品交换的关系、法律和道德伦理甚至宗教的关系、对它的社会成员构成一种限制与约束作用,从而形成一种相对稳定的社会结构。不过我们应该注意的是,元素之间相互作用所构成的结构的约束与限制,并不是使元素完全不变不动,而是给它们的运动与变化赋予某种规律和秩序。这种限制、约束乃至控制的作用,对于它的组成元素来说,是一种改变了它们行为的“下向因果关系”。总之,元素之间的相互关系和相互作用所造成的约束,在形成结构中起着关键的作用,而结构一旦形成,它又反过来对元素的行为起着关键的作用。现代物理学说明,一切自然系统归根到底都是来自对光子、电子、夸克的约束,来自对辐射能的约束。没有约束,一切处于混沌游离的状态,元素之间不处于特定空间的范围,不具有特定形态,不形成统一体,不发生有序的关系和遵循特定的整体的规律,因而也就是没有组织整体。正因为这样,最近有一些系统科学家,例如海里津干脆将系统定义为“对变量的约束”(a system is a constraint on variety),这个定义反映了系统性的极为重要的方面。^① 约束形成结构,构成对元素的下向因果关系。约束是有序与规律的同义语,反映了过程哲学的一个基本思想:关系比元素更重要,这正如怀特海说的:“不是性质范畴支配着关系范畴,而是关系支配着性质”。^②

►► 3.2 系统的环境与功能

▷▷ 3.2.1 系统的环境与边界

描述系统的第三个基本参量或范畴是系统的环境。所谓系统的环境,

① F. Heylighen, "Systems as Constraints on variation", in Heylighen and et. Al(ed): *The Quantum of Evolution*, New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1995, p. 62. Heylighen 的这个思想来自 W. R. 艾什比的《控制论导论》,见该书 7.2.1,其中说到了“规律只是约束的同义语”以及“机器(系统)是约束的体现者”。

② A. N. Whitehead, *Process and Reality*. Cambridge. at the University Press, 1929, p. viii.

指的是与系统组成元素发生相互影响、相互作用而又不属于这个系统的所有事物的总和。例如,化学反应系统的环境包括与该系统发生热传导、压力、光辐射及机械搅拌相互作用的一切事物,以及向该系统输入反应物和接受它们输出的生成物的一切系统。有机体的环境包括与它发生相互作用的无机界和有机界,例如阳光、空气、水分、矿物质、其他有机体、营养物以及污染物质等等。一个社会的环境包括气候、资源等地理环境,科学技术发展水平等技术环境,人力资源的素质、数量、分布以及教育水平等人口环境,以及与之发生关系的其他社会或国际环境等等。客观事物之间的联系是广泛的,许多事物总会通过各种中介,直接间接地与我们所研究的系统有关,因此,我们应该将系统的环境分为周围环境(around environment)与广大环境(wider environment),即系统的总环境。我们将与该系统有直接相互作用的事物的集合称作周围环境,而将间接地对系统发生影响,即影响较小的因素划入广大环境之中。

我们讲系统的环境,主要指的是周围环境。从这个观点看,所谓系统的周围环境不过就是包含了系统的上一层次的系统,即它所处的上部系统。例如染色体的周围环境就是它所处的其中的那个细胞,细胞的周围环境就是它所处所在的器官,一个器官的周围环境就是有机体的其余器官;一个生物的环境就是它所处的那个生态系统。这样看来,系统的组成元素与系统的环境是个相对的范畴,凡在本层次看是环境的东西,在上部系统看来则是组成元素。因此,从一个更广大的系统来看,所谓适应环境,不过就是广大系统各部分之间的内部协调适应。

从这个观点出发,在管理学中,将我们所研究的系统划分为兴趣的狭系统(NSOI—narrower system of interest)和兴趣的广系统(WSOI—wider system of interest)是有用的。当研究的应用领域集中于兴趣的系统(SOI)的一部分,即狭兴趣系统(NSOI)时,这个区分就有必要了,不过这时系统仍将保留密切相关(特别是彼此之间有反馈关系)的元素作为系统的一部分,而不将它划归环境,这就形成一个叫做 WSOI——即广兴趣系统的群体。这个思想也是管理学中的一个重要思想。

系统的主要概念在图 3.1 中得到了进一步解释。在这里,图(a)表明一个无关系的元素集,它是一种部分的聚合体(aggregate),元素的堆积物(heap)。图(b)表示一个只有少数有限关系的元素集,它并不组成一个系

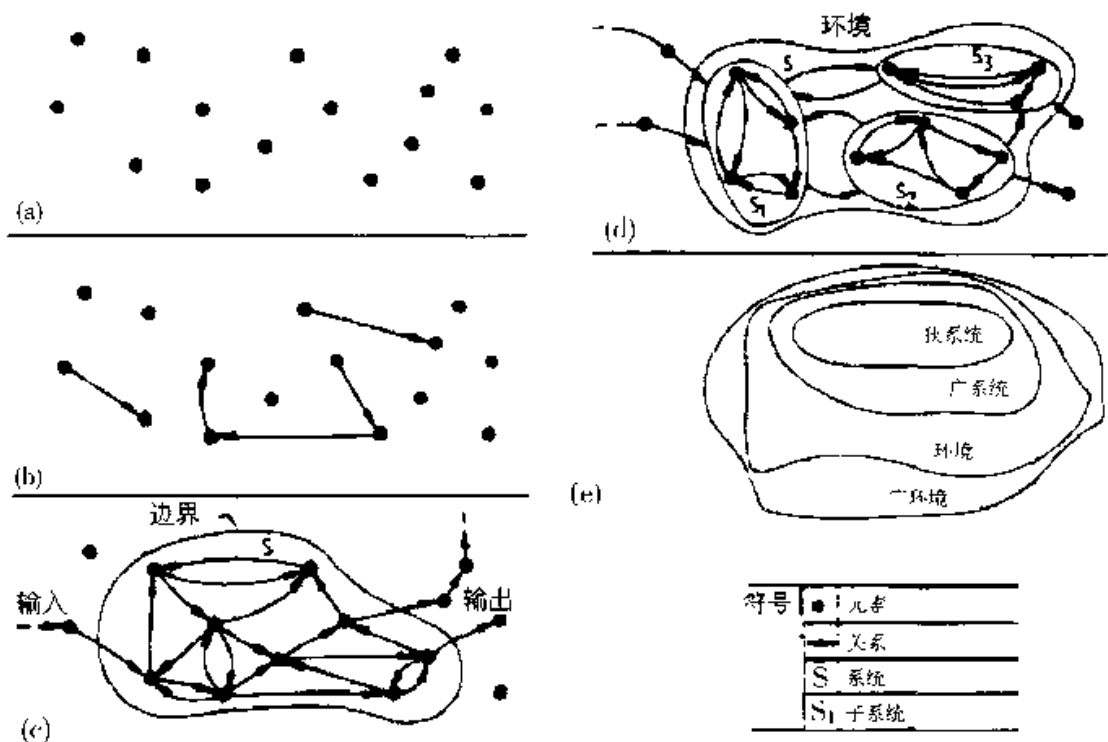


图 3.1 系统的主要概念图

统。图(c)表示了元素间有稠密关系的系统,它形成为组织整体。这些稠密关系帮助我们识别系统的边界 (boundary), 它的输入 (input) 与输出 (output)。图(d)表示包含有许多子系统 S_1, S_2, S_3 的系统 S , 每一个子系统可以认为是有边界的独特系统, 图(e)表示一个系统包含狭系统和广系统。它们有一个周围环境, 它与该环境有直接的物质、信息与/或能量的交换。而其他因素是借助于周围环境间接地影响系统的, 它们合起来称为广环境。

怎样解释这个系统—环境的四层划分? 我们以出售科学产品的厂商系统为例。可以想像它由若干数目的相关元素组成。假定这些组成包括: 公司计划部、市场营销部、信息管理部、人事部、会计部、研究与开发部以及生产部门。每一个元素都可以看做是该系统的子系统。例如生产部有许多相互区别的小组与阶段, 它们紧密联系着, 相互形成为一个独特的子系统, 但这个子系统依赖于人事部门提供职工人力资源、市场营销部提供和出售产品、研究与开发部门提供新产品等等。每一子系统与其他子系统交换物质与信息, 它的行动可以直接反馈到自身, 再施加出去。研究与开发部可能决定每周的政策讨论会, 讨论他们的研究工作, 这会导致它们需要的产品的输入, 并且影响其研究工作的进展, 这是一种反馈作用。假设这个公司是高质

素的公司,外部的顾客与供应者必须描述为系统的一部分,那么,常规地围绕组织的主要功能而画出的边界就会扩展到外部顾客和供应者,把他们也看做公司系统的一部分,甚至是重要的一部分,用网络将他们联系起来,于是它就成为 WSOI。因此,一个公司的售后服务网络就属于 WSOI,而厂商系统自身就变成 NSOI。竞争者所取得的科技开发成就就会影响 WSOI,它们被看做周围环境的一部分,而其他的发展,如政治的、经济的、技术的发展,则以间接的方式影响这个系统,它们被描述为广环境。

任何系统都是个人或集团的独特的创造,它是由兴趣、利益与目的来定向的,因而被称为“SOI”(利益系统,兴趣系统,或译为影响的系统,这依各人的喜爱而定)。例如,对于某一个公司或厂商系统,英国经济学家将它看做是经济系统,社会学家将它看做是社会系统,自然资源保护者则看做对自然的威胁,前苏联某些人可能将它看做是一种军事威胁,许多工厂搞绿化的园丁甚至可能将它看做是绿色的家园。可见,这要视研究者的兴趣或目的如何而定。

在研究系统时必须明确系统的边界。所谓边界(boundary),指的是系统与环境的分界面(interface)或假想界限。确定系统的边界能够使问题更加明确。例如,一个组织的职责范围的划分,就是确定这个组织系统及其子系统的分界面。系统科学与系统工程理论认为,一个系统与环境的划分对于系统的发展来说有个最优的分界面。如从地理上说,一个城市搞得很大和搞得很小,对于它的发展来说都是不利的。一个企业也是如此,企业的规模到底达到多大才合适,这取决于它的规模效益的收入和交易成本的支出。企业越大,规模效益会增加,但同时内部管理费用也增加,内部交易成本增大,因此,它迟早会达到一个界限,这就是企业与环境的最优分界面。关于这个问题,经济学家科西做了很好的分析,并因此获得了诺贝尔经济学奖。有一些系统是有特别的空间边界的,并且这个空间的边界与空间的领域是随着时间的变化而变化的。识别这个空间边界和边界内部的空间领域及其随时间变化的方式,就等于定义了这个系统。例如,一个人在空间上有一个生理的边界。这个界面粗糙地说,就是他的皮肤。皮肤之内是系统,皮肤之外是环境。但是有许多系统是没有对应的空间分界面的。例如经济系统,在空间上,它有许多领域是与社会其他系统交叉重叠的。要将经济系统、政治系统、文化系统甚至宗教系统在空间上截然分开是不可能的。在与外界

环境没有相互关系或很少相互关系的封闭系统中,其边界是比较容易确定的。而在开放系统中,由于系统跨越边界与它的环境发生物质、能量、信息的交换,边界识别的任务变得困难起来。由于系统的边界问题的重要性,有一些系统学派干脆用边界来定义系统。例如,美国新英格兰复杂系统研究所杨尼尔·巴杨就将系统定义为“乃是被描述的宇宙的这些部分,它用假想的边界将它与其余事物区分开来”^①。

▷▷ 3.2.2 系统的功能与目的

系统的功能是描述系统的第四个基本范畴。系统的功能是在系统与环境相互关系中表现出来的系统总体的行为、特性、能力和作用的总称。系统总体的活动正是通过它与环境之间的输入(外界环境对系统的作用)、输出(系统对外界环境的作用),特别是输入和输出的相互关系而表现出来的。在下一节中我们将要指出;一个系统的变化的集合,称为系统的行为。例如,一定的航向、一定的速度、发出轰轰作响的声音,都是飞机这个系统的行为。一只动物,游泳、飞翔、打洞、捕食,在天敌追捕下逃走,都是它的行为。功能与行为一词差不多,不过它是从外部、从系统与环境的关系来看的系统行为。它将系统放在一定环境中来考察,考察它对外界环境起作用的能力。控制论认为,功能就是系统将一定的物质、能量、信息输入变换为一定的输出的能力。如消化系统的功能就是将输入的食物转换为可供身体吸收的物质和无用的排泄物的能力。火力发电厂的功能就是将煤的化学能转变为电能的能力。而收音机的功能就是将无线电波转换成声音输出。所以,功能概念与系统环境的概念,系统对环境的输出和环境对系统的输入概念密切相关。

一个系统可以是有目的的,也可以是无目的的。许多自然系统,就很难说它是有目的的,例如太阳是一个系统,它的目的是什么?是发光?发热?运行?很难这样来表达它。但系统工程和系统管理学所研究的系统是有目的或有目标的。它们所研究的系统就是这样一组元素的集合,它们是为了达到特定的效用目标而相互联系起来的统一整体。例如美国阿波罗登月系

^① Yaneer Bar-yan, "Guide to Complex Systems." Concept Map System. <http://neesi.org/16080/guide/concepts/system.html>.

系统工程就是为了达到十年内将人送上月球的目标而组织起来的人—机大系统。此外,行政系统、教育系统、经济系统、银行系统、地铁系统等,都属于有目的系统的范畴。所以韦伯大辞典是这样定义系统的:“系统是由许多通常是种类不同的部分,依照一个共同的计划或适用于一个共同目的所组成的一个复杂统一体。”^①(特别是硬系统工程。)

当一个系统为有目标的系统时,其功能就是为达到这个目标的各种行为,是将输入有目的地转变为输出的能力。在系统工程所研究的系统中,目标必须明确定义和明确理解,以使系统在给定的输入下有预期的输出,而且一旦明确了系统的目标,就有可能对系统的优劣做出定量的评价。所以对于有目的的系统来说,目的性或目标是这些系统的第五个参量,而且是最重要的参量。

系统工程和系统管理学所研究的系统,无论有多少层次,都有一个总目标,它的各级组成元素、属性和关系,都是围绕这个目标组织起来的,因而总体系统约束和限制着它的子系统,而子系统又约束和限制着它的元素。例如消防系统工程,它的建筑物、消防设备、消防员、通讯设备,以及它的补给能力,这些系统都是为了救火这个目标组织起来的。

用系统观点看系统,就是着重用从上而下的观点(up-down 或 outside-in 的观点),而不只是从下而上(inside-out 或 bottom-up)来看系统。它首先将系统看做是一个与环境相互作用的黑箱,从而考虑它对环境的功能,进而观察那些较小的黑箱(子系统),注意它们怎样结合起来达到系统的目标,然后再进一步考察更深层次的黑箱。系统工程和系统分析就是这样来处理系统、设计系统、改进系统的。可见,系统观点首先注意的是系统的功能关系。当然最终用什么元素组成系统也是重要的,不过是从最后我们用什么功能关系将它们联系起来以达到什么目的这个观点来注意它。这就是系统科学和系统工程的所谓功能主义观点方法。这里我们要补充说明一下什么叫黑箱。所谓黑箱,就是我们不知道或假定我们不知道它的内部元素与结构的事物。这个概念是在电机工程中首先出现的。给电机工程师一个密封箱,上面有些输入接头可以随意通上多少电压、电击或任何别的干扰;此外还有输出接头,可以借此做所能做的观察,来了解这个黑箱的行为。关于这个问

^① R. F. 迈尔斯主编:《系统思想》,杨志信、葛明浩译,四川人民出版社1986年版,第4页。

题,我们将在第5章《系统方法》中做详细讨论。

►► 3.3 系统的状态和状态的变化

以上主要是从静态的观点来研究系统的,本节转换一个角度,从动态的观点,即从系统是怎样运动和变化的观点来看系统,所以特别注重研究系统的状态和状态的变化,以及状态变化的变换。

▷▷ 3.3.1 系统的状态和状态空间

系统科学的目的,不只是描述某些特定系统具体是什么,由哪些物质成分组成,而且还要描述一般系统的变化方式和行为方式。因此,要描述一个系统,就要寻找和选择一批变量来表述系统的元素以及元素之间相互关系的特性,例如物体的温度、电容器中的电荷、银行的存款数、物种群体的大小、一个国家国民生产总值的多少以及对外贸易额的数量等。我们称这些量为状态变量(state variables)。当然要描述一个系统会有许多状态变量。例如,要描述一座摆钟,就要设定下列的变量:钟摆的长度(x_1),摆锤偏离垂直位置的角度(x_2),钟摆运动的角速度(x_3),特定的嵌齿轮的角度位置(x_4),拖曳钟锤的高度(x_5),分针在面盘上的读数(x_6),等等,视实验和选择问题的需要来确定。当人们这样做时,常常将这座摆钟的其他特征,如摆锤的化学组成、它表面的反射能、它的形状与美观以及它的表面的细菌污染程度等等统统忽略,不列入系统变量之列。设描述某系统的变量为 X ,则

$$X = |x_1, x_2, \dots, x_m|$$

m 为状态变量的个数。这就是系统状态变化的概念。

这里 X 又称为状态矢量(state vector)。这个矢量是 S 系统状态的总称,它可以分解为它的分量 $x_1, x_2, \dots$ 等等。就像空间中的一个力,可以用平行四边形法则分解为三个坐标维度的分量,而三个维度的力的分量又可合成为一个空间中的力的矢量。上面所说的那个摆钟状态矢量,就是由 6 个分量组成的,记为 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。

状态变量和状态矢量都是随着时间的变化而变化的,在特定时间里有它的特定值。一个系统在特定时刻 t 的状态 $X(t)$ 由它的诸状态变量在特

定时刻(t)的值,即 $x_1(t), x_2(t), \cdots x_m(t)$ 所组成。例如上述摆钟系统在某个时刻的状态是从 $x_1(t_0)$ 到 $x_6(t_0)$, 它们分别为 $88.4\text{cm}, -4^\circ, 0.3$ 弧度/秒; $128^\circ, 52\text{cm}, 42.8$ 分, 等等。这些分量合成为某时刻摆钟的状态。系统的状态是十分重要的概念, 而所谓系统的状态(a state of system)就是有确定标志的这些 $x_i(t)$ 的值的总和。

系统的状态的描述, 可以由一张表来表示, 表中列出量 $x_1, x_2, x_3 \cdots$ 的值, 于是系统状态的变化就由不同时间有不同的 x_i 的值来表示, 就像一个人每年进行体格检查时, 其体检表上记了身高、体重、血压、血糖、血脂、尿酸、呼吸、脉搏等等的值, 合起来表明其当年的身体健康状态一样。过了一年, 这个人又有另外一批数值, 表明他有另外一种健康状态。下表列出一个患急性肾炎的病人的状态, 状态变量有 x_1 (他的体温), x_2 (血压的收缩压), x_3 (血压舒张压), x_4 (血中的剩余氮含量, 单位为毫克%)

表 3.1 一个患急性肾炎病人的状态和状态变化

日期	时间	体温($^\circ\text{C}$)	血压(毫米汞柱)		血中的剩余氮含量(毫克%)
			收缩压	舒张压	
2月7日	上午9时	37.8	190	120	103
2月8日	上午9时	37.6	180	120	95
2月9日	上午9时	37.4	170	95	89
2月10日	上午9时	37.0	165	90	90
2月11日	上午9时	37.1	175	100	103
2月12日	上午9时	37.6	180	100	100
2月13日	上午9时	37.5	170	90	91
2月14日	上午9时	37.1	160	90	84
2月15日	上午9时	37.1	150	90	60
2月16日	上午9时	36.7	145	85	49

描述系统的状态也可以用状态空间的方法来表示。如果一个系统只有三个状态变量, 则在特定的时间里, 其状态便可由三维空间当中一个点来表示。例如, 如果表 3.1 的肾炎病人只有体温(x_1), 血压收缩压(x_2), 血中剩余氮(x_3)三个变量, 则由 x_1, x_2, x_3 组成笛卡儿三维坐标, 空间中点(37.8, 190, 103)就代表了2月7日他这个系统的状态。把这种情况推而广之, 假

定空间有 n 维, n 代表描述系统的独立变量 x 的数目, 这里 $x > 3$, 系统 S 某个时期的状态仍然可以用空间中一个点来表示。不过这个空间称为系统的 n 维状态空间, 这个独立变量的数目通常叫做系统的自由度。这个空间点叫做状态空间表现点或示象点 (representation point), 而 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 叫做系统的坐标。

▷▷ 3.3.2 系统状态的变化

随着时间的推移 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 各有不同数值。这就是系统状态的变化, 这种变化就可用状态空间的表现点描出的状态空间的轨线来加以表示。这个轨线 (trajectory) 称为系统的行为曲线 (line of behavior)。例如在表 3.1 中, 假定体温 (x_1), 血压 (x_2, x_3) 和血中剩余氮量 (x_4) 组成一个四维空间, 其中的表现点在 2 月 7 日定为 $X(7) = (x_1(7), x_2(7), x_3(7), x_4(7)) = (37.8, 190, 120, 103)$, 2 月 8 日为 $X(8) = (x_1(8), x_2(8), x_3(8), x_4(8)) = (37.6, 180, 120, 95) \dots\dots$

这些表现点的连线就是这个肾炎病人的行为曲线, 表现了他的病情的变化。这个行为轨线的第一个状态, 称为行为轨线的初始状态。

当然, 我们要研究一个系统, 还必须研究系统环境的各种变量。然后固定某些环境变量的值来考察在特定的环境条件及其变化下, 系统将怎样从一种状态变化到另一种状态, 来发现系统状态变化的规律性。

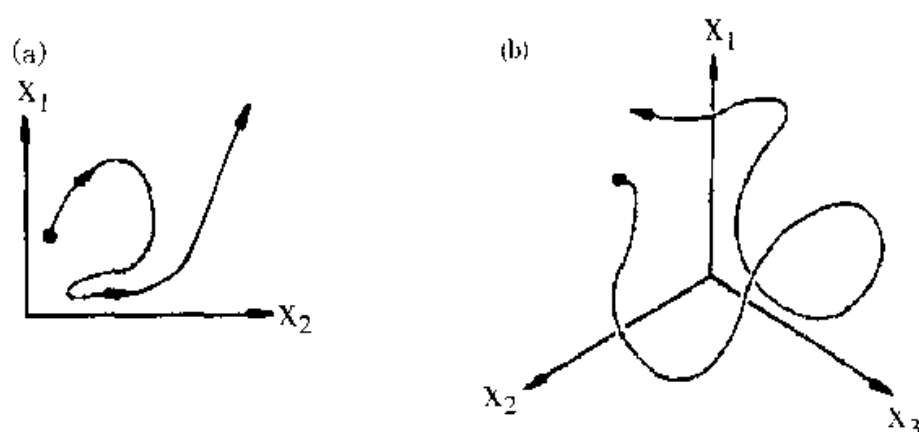


图 3.2 系统的状态轨线

上图中, (a) 为两个状态变量系统, (b) 为有三个状态变量的系统。在

这里,时间不属于系统变量,它属于描述系统的支持变量,所以它不是状态空间中的一根轴。不过轨线是表现点依时间变化而在空间中走动,描成一条曲线。

关于系统的状态变化,有下列几种变化特别值得研究:

1. 连续的状态变化和离散的状态变化

对系统状态变化的描述,可以是连续的,也可以是离散的。如果刚才所说的肾炎病人带上一个 24 小时的监测器,而不是每天定时(上午 9 时)测一次,则它的状态变化的行为曲线是连续的,可以从他身上的跟踪器中取出连续曲线图来看。如果每天测一次或测几次,所构成的系统状态变化则是离散的,它是一点一点地跳着的。在复杂系统的研究中,由于变量复杂多样,而且是非线性的和不连续的,有时甚至不可度量而只能加以定性表达,所以状态变化常常是离散的。不过,这种情况在现代数学中也划入变量的范畴:变量包括连续量和离散量,包括可表达为数值的和不可表达为数值的两种,但它们的值域都用一个集合来表示。例如起床、早操、上课、下课、吃饭、午睡、跳舞、打球、谈恋爱……可能是某人一天的状态集合,它们是离散的,甚至在量上和质上是不可通约的。这种变量状态的变化,大概可以由一个作息时间表给出。艾什比在《控制论导论》一书中用三鳍棘鱼的雌鱼与雄鱼组成的系统来说明系统状态在定性方面的变化的描述。他写道:“雄鱼或雌鱼的每一反应是由其对偶的前一反应传给,图中的每一箭头表示一因果关系,这因果关系经过用一假鱼和真鱼做实验后证明确实是存在的。雄鱼的第一个反应是摆游,它是由于见到雌鱼体上的某种特征而激起的,例如,鼓起肚子和某些特殊的活动,雌鱼见到雄鱼体上的红色和摆游后,就游向雄鱼,这就使雄鱼转头迅速游向鱼洞,这又引起雌鱼跟踪游去,从而引起雄鱼把头窜进洞口,它的这一动作又引起雌鱼的下一反应:雌鱼也进入洞口……这又引起雄鱼的颤动,这导致雌鱼产卵。穴内有了卵,就使雄鱼能授精。”^①记雌鱼为 F,雄鱼为 M,则这个状态变化过程可以表达如下:

上图已经表现了一条之字形的轨线,粗约地说,如果用状态空间表示法,这里有五个点 $D_1(F_1, M_1)$, $D_2(F_2, M_2)$, $D_3(F_3, M_3)$, $D_4(F_4, M_4)$,

^① W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall LTD, 1957, pp. 26-27.

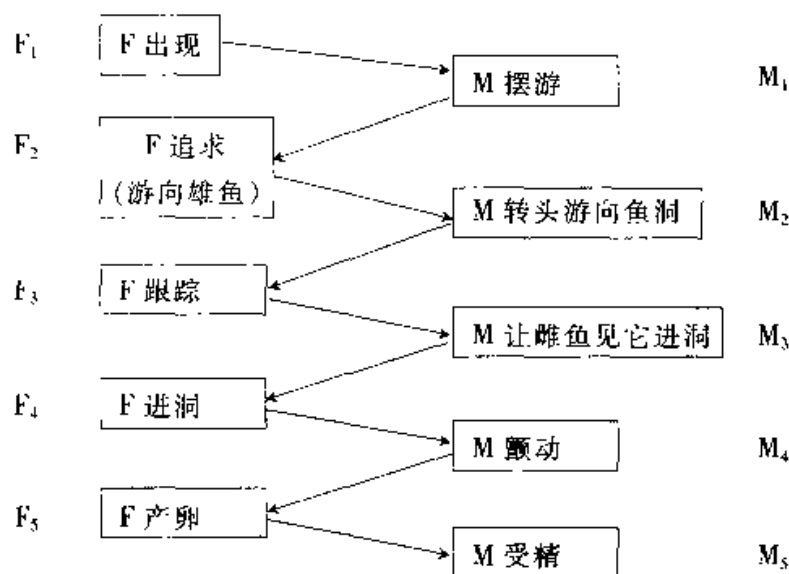


图 3.3 三鳍棘鱼雌雄系统状态变化图

$D_5(F_5, M_5)$ 。这五个点联成三鳍棘鱼雌雄系统状态变化的不连续的轨线。如果再加上一个点 $D_6(F_6, M_6)$ 表示 F 与 M 恢复一种正常状态,这可表示其性关系过程的结束。

现在,我们还可以用函数的语言来表述这种状态变换,假定由一种状态 (a_0, t_0) 变换到另一状态 (a_1, t_1) ,是某个算子作用的结果,即 $a_1 = T(a_0)$ 。 a_0 称为运算原象(对象), a_1 称为变换象(映像), T 称为算子。显然,在算子的接连作用下,必须把前次运算中得到的变换象再看成原象来施加算子的作用。这种对某对象的状态反复施加一个算子的作用,叫做叠代。它对复杂系统的研究具有重要的作用。在本节中,这种相继转移到的状态 $a_0, a_1, a_2, \dots$ 的过程,就可以看做连续对状态施加算子作用的结果,算子作用步骤进行 n 次,就有

$$a_n = T^n(a_0)$$

算子 T 正是表征了该系统的一种导致状态变换的性质。上例的雌雄三鳍棘鱼的状态变换,就是某种性关系算子(S)作用的结果, $D_2 = \text{Sex}(D_1)$, $D_3 = \text{Sex}(D_2) \dots \dots D_5 = \text{Sex}(D_4)$, $D_6 = \text{Sex}(D_5)$

我们可以用一个变换图来表示上述的状态变化

$$\begin{array}{cccccc} & D1 & D2 & D3 & D4 & D5 & D6 \\ \text{Sex: } \downarrow & & & & & & \\ & D2 & D3 & D4 & D5 & D6 & D6 \end{array}$$

图式上行表示雌雄棘鱼的不同状态,它处于原象的地位。下行表示对原象施加一次算子 Sex 导致相对应的映像。如果对 D_1 连续施加五次运算,便得到三鳍棘鱼性关系状态变化的序列: $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow D_3 \rightarrow D_4 \rightarrow D_5 \rightarrow D_6$; 即 $D_5 = \text{Sex}^4(D_1)$, 以及 $D_6 = \text{Sex}^5(D_1)$ 。

2. 状态变化与变换变化

以上讨论的是系统从一种状态变换到另一种状态的变化。例如 a 变到 b , 或上例的 $D_1 \rightarrow D_2$, 它是系统的一种行为或行为方式。但是还有第二种变化, 就是从一种变换到另一种变换的变化, 例如从 T_1 变到 T_2 。这是一种行为方式的变化, 它与状态变化有着根本的区别, 虽然它导致另一种方式的状态变化。假定某个水域里有雌雄棘鱼各十条, 有一些棘鱼的性关系已经结束而处于一种饥饿的状态, 假设现在投放一些饲料, 棘鱼之间就会发生另一种方式的状态变化, 例如抢食食物, 直到吃光为止。这里就有 (看到食物) $\rightarrow$ (迅速游向食物) $\rightarrow$ (吞食) $\rightarrow$ (抢食) $\rightarrow$ (吃饱) $\rightarrow$ (离开) 这些状态的变化, 比起上述的性爱有着不同的行为方式。这是由一种变换 $T_{\text{性}}$ 到另一种变换 $T_{\text{食}}$ 的变换。

为了研究的方便, 现在假定变换 T_1, T_2, T_3 都作用在同一组原象上, 例如都作用在 a, b, c, d 上, 如果这四个变换是:

$$T_1: \downarrow \begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ c & d & d & b \end{array} \quad T_2: \downarrow \begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ b & a & d & c \end{array} \quad T_3: \downarrow \begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ d & c & d & b \end{array}$$

于是状态的变换可写成

$\downarrow$	a	b	c	d
T_1	c	d	d	b
T_2	b	a	d	c
T_3	d	c	d	b

为了使这个系统能正常运作, 必须有一个导致变换变化的变换, 比如说用 U 来表示, 它由下表给出

$$U: \downarrow \begin{array}{ccc} T_1 & T_2 & T_3 \\ T_2 & T_2 & T_1 \end{array}$$

因为 U 是变换 T 的变换, 所以我们可以称它为元变换 (meta-transformation), 它通常代表系统状态变化的一个置换程序 (replacement procedure)。

原则上,这个置换程序也是可以变化的,这个变化又可用一个高阶置换程序来规定,它被称为二阶元变换。这种研究对于以后我们理解元系统跃迁、适应性和自组织以及系统进化都是非常重要的。因此,我们现在需要从抽象的符号分析转到举一些略为具体一点的实例来加以说明变换的变化:

例1,假定表3.1中所描述的肾脏病人病情恶化,导致肾功能失常,这时,体中血液的尿素氮含量常达每100毫升超过150毫克的程度,一旦到达这个程度,他的肾功能就需要由一个所谓血液透析仪来替换。这样他的血液循环和肾功能的状态,就有两种类型的变换:

T_1 :它是在不起动血液透析仪时的状态变化,这时,体温有可能上升,上升到超过人体正常值,特别是血中的含氮量也会缓慢上升,以至达到严重程度。

T_2 :它是起动了血液透析仪的状态变化,这时体温会下降,血液中含氮量也会下降,以至于下降到正常值。不过体内血液循环中加上了一个机械装置。血压状态变化有可能失常,这是要常加注意并加以调整的。

这里元变换 U , 是一个置换程序,它由下表给出

元变换	血中氮超过 150%	血中氮降至 150% 以下的某点上
$U \downarrow$	T_1	T_2
	T_2	T_1

例2,在某繁忙的交叉路口,设有A,B,C,D四盏交通灯,又有红、黄、绿三种颜色的变化,这样变换的原象就有12种状态。在每一分钟或每二分钟内,又规定了每一状态在什么时候转变为下一个指定的状态。为了应付每天不同时间的不同车辆情况,交通警察局规定了夜间交通控制(T_1),日间正常交通控制(T_2)和繁忙时间交通控制(T_3)三种不同类型的状态变换程序。现在将三种不同状态变换程序列表如下,请注意A灯指挥的是从北到东和从南到西的转弯车辆,B灯指挥的是南北直走的车辆,C灯指挥的是从东到南和从西到北的转弯车辆,D灯指挥的是东西直走的车辆。

(a) 状态变化图

T₁:夜间交通控制

$t_i \in$	(0, 20)	(20, 30)	(30, 50)	(50, 60)
A	绿	黄	红	红
B	绿	黄	红	红
C	红	红	绿	黄
D	红	红	绿	黄

T₂:日间正常交通控制

$t_i \in$	(0,15)	(15,25)	(25,55)	(55,65)	(65,80)	(80,90)	(90,110)	(110,120)
A	绿	黄	红	红	红	红	红	红
B	红	红	绿	黄	红	红	红	红
C	红	红	红	红	绿	黄	红	红
D	红	红	红	红	红	红	绿	黄

T₃:繁忙时间交通控制

$t_i \in$	(0, 30)	(30, 40)	(40, 50)	(50, 60)
A	红	红	红	红
B	绿	黄	红	红
C	红	红	红	红
D	红	红	绿	黄

(b)变换变化即元变换图

元变换时间	上午 6 时	上午 7 时 下午 4 时	上午 9 时 下午 6 时	下午 11 时
U ↓	T ₁	T ₂	T ₃	T ₂
	T ₂	T ₃	T ₂	T ₁

3.4 系统的稳定性

稳定性一词是关于状态和变换的,而不是关于某个物体的。不能说某个物体是稳定的还是不稳定的,即使这样说其意思也指的是它的状态,或状态对于变换是稳定的还是不稳定的。同一物体在某种条件下可以是稳定的,而在另一种条件下也可以是不稳定的。稳定性一词有许多不同的含义,我们将从最简单的情况讲起。

3.4.1 平衡状态(state of equilibrium)与固定点(fixed point)

平衡状态是这样一种状态:系统经过变换仍然保持原有状态,即它不随时间的变化而变化。若时间由 $t \rightarrow t'$, 则状态 $X(t') = X(t)$ 。如用代数式来表示,则为对于变换 T , 若 $T(X) = X$ 时, 则 X 为在 T 下的平衡状态。

设有变换 T , 其代数式表达如下:

$$T: \begin{array}{cccccccc} a & b & c & d & e & f & g & h \\ \downarrow & & & & & & & \\ d & b & h & a & e & f & b & e \end{array}$$

上表中上行为 t 时的状态, 下行为 t' 时的状态, 则因

$T(b) = b, T(e) = e, T(f) = f$, 故 b, e, f 三个状态对于 T 来说是平衡状态。

平衡的状态就是某种不变性, 而且是状态的所有分量都是不变的。用导数来表示, 如果某状态只有两个分量 x, y , 平衡就是 $\frac{dx}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = 0$ 。

例如有微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 2x - y^2 \\ \frac{dy}{dt} = xy - \frac{1}{2} \end{cases}$$

该方程组在 $(\frac{1}{2}, 1)$ 的状态点上保持平衡, 因为 $x = \frac{1}{2}, y = 1$ 时,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} = 0。$$

一个球放在铅笔尖上保持不动(不稳定平衡),在桌面上随意滚动后可随意保持不变(随意平衡),或它放在一个碗中保持不动(稳定平衡),都是某种平衡状态。一个成年生物体在某一个时期里,身体各部分保持不变,也可以说处于一种平衡状态中,不过这里要很好地选择一些变量才能说明这一点。处于平衡状态的状态空间中的那个点,叫做固定点,如果系统没有经受什么干扰,系统的状态始终保持在这个点上。

▷▷ 3.4.2 周期(periodic)变化与极限环(limit cycle)

有时系统的状态沿着一个封闭的状态变动,绕圆圈周而复始地变化,例如几十亿年以来地球沿着绕太阳的轨道周而复始地运动。地球自转也是一样,所谓“太阳下山,明天还会爬上来,花儿谢了明年还是依样地开”,这也是一种自然界的普遍的恒定性形式,即状态序列的恒定性。形式地说,设 T 为下述变换:

$$T: \begin{array}{cccccccc} & a & b & c & d & e & f & g & h \\ \downarrow & & & & & & & & \\ c & h & b & h & a & c & c & g & \end{array}$$

从初始状态 a 起,由于 T 的作用有下列变迹:

$$a \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow h \rightarrow g \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow h \rightarrow g \rightarrow c \rightarrow b \cdots$$

便形成按如下图所示绕行的周而复始的运动:

$$\begin{array}{ccc} c & \rightarrow & b \\ \uparrow & & \downarrow \\ g & \leftarrow & h \end{array}$$

这个周期地经历的有限状态序列在状态空间中的表现,就叫做极限环。

▷▷ 3.4.3 稳定域(stable region)

稳定域指的是这样一个区域(即某个状态集),系统的变换(T)结果都逃不出这个区域或集,即它不会产生出新的状态,则称这个状态集为相对 T 的稳定域。

形式地,若 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$, $T(x_i) = x_j$, $i, j \in n$, 则称 X 为对于 T 的稳定域。

若变换是连续的,则起变化的一组状态可能位于一个连通的区域内,如图 3.4 所示,从状态空间的轨线中可以看出,边界 A 内的区域对于状态变

化是稳定的,系统的状态空间的轨线只能进入这个区域而不能走出这个区域。但在B内情况就不一样,因为域内像P那样的表现点,是要变到域外去的。

3.4.4 系统的稳定性

有了固定点(平衡状态),极限环(循环圈)和稳定域的概念,我们就可以讨论系统稳定性的概念,即系统在外界干扰下的稳定性问题。任何系统,无论是自然系统,社会系统还是人工系统,都处于外界环境的不停的干扰之下,例如一部电子仪器,常处于电压变动,温度湿度变动乃至空气中的尘埃的干扰之下。说这部电子



图 3.4 变换中的稳定域

仪器在一定的干扰下是稳定的,这是什么意思? 一个生物,无时无刻不处于空气、水源,天气、食物资源以及天敌的影响和干扰之下,说它在这些环境的干扰下保持稳定性又是什么意思呢? 这里所说的干扰,就是将系统S的一个状态迁移到另一个状态。所以系统S在干扰D下保持稳定性,指的是干扰D将系统带离它的固定点、极限环或稳定域后,系统仍能通过它的变换,返回原来的状态。这种性质就被称为系统的稳定性。现在我们讨论系统离开平衡态a后的稳定性。

设系统存在着一个固定点为a,干扰算子为D作用于a产生了另一状态 $D(a)$,变换为 $T, T^2, T^3, \dots, T^n$,则在一个有变换T的系统中,系统平衡状态固定点a在干扰算子D作用下是稳定的,当且仅当

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T^n D(a) = a$$

设有一个六面正立方体被置于桌面之上达到平衡,当它受手的干扰,其底面与桌面的倾角 φ 大于 0° 而小于 45° 时($45^\circ < \varphi < 0^\circ$),当手松开后,立方体能返回原来平衡位置,所以我们说该立方体在这种倾角 φ 变化的干扰下是稳定的;当这个倾角干扰(D')超过 45° 时,系统不能恢复原来的平衡状态,因而这系统对于 D' 来说是不稳定的。对于生物系统来说,讨论它的稳定性也必须明确干扰D和原有平衡状态a。例如人体的体温正常温度是在

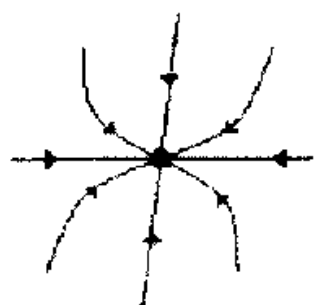
36.7℃左右,当外界环境的温度提高到40℃、甚至短时间提高到50℃时,人体体温仍能返回正常温度,但当外界温度达500℃(例如大火)时,没有其他设备的保护,人体体温就不能保持稳定性,从而人的生命也不能保持稳定性。

所以,系统状态的稳定性表现为系统状态的变化向固定点、极限环和稳定域的收敛。它是系统的一种性质,即系统的状态或行为离开它的平衡点、极限环或稳定域时,系统能返回它的稳定态。下面是稳定性的几种表现图:

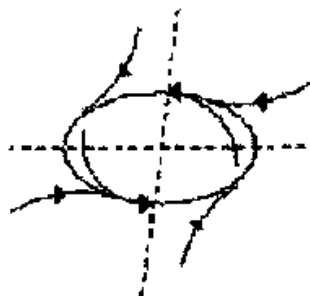
(a) 向稳定点收敛

(b) 向稳定环收敛

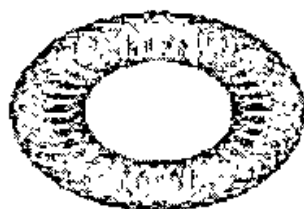
(c) 向稳定域收敛



(a)



(b)



(c)

图 3.5 系统状态稳定性的几种形式

在现代复杂系统科学中,学者们称系统状态稳定性的几种形式为几种吸引子,系统状态在一段较长的时间里总是倾向于集中到这个区域(固定点、极限环和稳定域),有时人们还称这几种稳定域为目的点、目的环和目的域。不过最近几十年来,人们在混沌学中发现了新的吸引子,这就是奇异吸引子,本书在以后的章节中将对它进行讨论。

▷▷ 3.4.5 系统的适应性自稳定

当系统的稳定性的域指的是本质变量或系统结构自身的稳定性,并且这种稳定性是由系统的一种内部机制自行达到时,我们称这种系统的稳定性为适应性自稳定。

1. 本质变量指的是与系统的结构存在密切相关的一组变量,它必须保持一定的阈值系统才能存在,否则系统便要解体。对于一种生物来说,所谓

本质变量就是这样一些变量,它们必须保持在一定的生理学的阈值之内,这生物才能生存。一个女性的头发从半米长剪短到5厘米甚至剪至0厘米,即整个剃光了,这种变化对于她的生存的影响是微不足道的,但如果其心脏收缩的血压从120毫米汞柱降到30毫米,这种变化就会致她死亡。每一种生物都有许多变量是与之生死攸关的,而且它们之间有着密切的动态关系,其中任何一个发生显著的变化,都迟早会引起其他变量的显著变化。所以如果我们发现她的脉搏降到接近零,就会预料她的呼吸也会很快停止,她的体温也会很快降到(或升到)室温,而她组织中的细菌则会很快地从接近于零升到很高的数目。这些密切相关的变量可以看做是一个人或一个哺乳动物的本质变量。

2. 本质变量的稳定与维持生存。本质变量的稳定,就是这些本质变量的变化保持在它的结构存在许可的范围内。对于一个动物来说,就是保持在生理学的限度内。这就是所谓维持生存。

3. 适应性自稳定或适应性生存。如果系统具有自稳定的性质,也就是说,它总有一种条件或机制,当环境使它的状态离开本质变量的平衡点、平衡环和平衡域时,总可以返回平衡状态,或至少也会使它的本质变量保持在结构存在许可的范围里。在动物界中,就是它有一种内部机制,使它的基本变量保持在它的生理学限度之内。例如血液中的葡萄糖浓度不能低于0.06%,否则组织就会因为它的主要能源匮乏而瓦解;但这个浓度也不能超过0.18%,否则就会引起糖尿和其他不良生理后果。但人的身体有一种功能,当血液中的葡萄糖降至0.07%左右时,肾上腺就会分泌肾上腺素,使肝将贮存的糖元变成葡萄糖,同时葡萄糖降低会刺激食欲,摄取食物提供葡萄糖,这些葡萄糖进入血液制止其含量下降。反之,当血液中葡萄糖浓度升得过高,胰腺的胰岛素分泌就会增加,从而导致肝将葡萄糖从血液中取走一部分,而如果它的浓度超过0.18%,肾就会将葡萄糖排到尿中去,这是一种适应性自稳定的机制。同样,人的视网膜在一定强度的光照下功能最佳,光线过强,神经系统使瞳孔收缩,光线太暗它就会放大,以这种机制或方法使进入眼球的光量处在一个合适的限度内。

这些情形就是系统的适应性自稳定或适应性生存,而所谓适应性,就是这样一种行为方式或状态变换方式,它导致系统本质变量的变化保持在系统结构存在所许可的范围内;对于生命世界来说,就是保持在它的生理限度

的范围内。

适应性自稳定性是系统的一种重要的普遍性质,系统哲学家欧文·拉兹洛将它列为系统四大普遍特性之一。关于这种适应性自稳定的机制,我们将在第4章《系统思想》中进一步加以分析。

第4章

系统思想

本章在系统概念的基础上讨论系统思想。这里所说的系统思想,指的是支配一般系统、特别是复杂系统的运作的基本原则、基本原理和基本定律,它对于理解本书以后各章是一个关键。

著名英国系统科学家 P. 切克兰德在 1981 年撰写的《系统思想,系统实践》一书中指出,当代的系统运动虽然并不成熟,但是它已形成了区别于还原主义并又与还原主义相互补充的关于系统整体的“基本规定”、“基本思想”、“基本语言”和“统一原理”。他说:“系统思想建立在两组概念上,它们是突现与层级、通讯与控制”。^① 不过,由于自 20 世纪 80 年代开始对系统自组织和系统进化的研究有了很大的发展,特别是目前正成为系统科学研究热点的复杂适应系统和复杂系统动力学研究,又突出了第三组原理:进化与自组织。因此,本章所讨论的基本系统思想,以三组原理为主线,即(1)突现与层级原理,(2)通讯与控制原理,(3)进化与自组织原理。而有关系统的一些基本定律将在这“三把伞”的框架下进行论证。这三组原理不是相互孤立的,而是相互联系和相互交叉的。

►► 4.1 突现与整体性原理

突现与层级是系统思想的第一组基本原理。突现与层级概念的形成是一般系统论和系统科学开始出现的标志,因而有必要追溯它的简要历史。

① Peter Checkland (1981), *Systems Thinking, Systems Practice*. New York: Wiley. 中译本见《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 93 页。

▷▷ 4.1.1 突现与层级的概念史

“突现”一词首先说的是系统整体出现了其组成部分所不具有的性质。这个思想起源于亚里士多德。他在《形而上学》一书中说过：“整体不等于部分和”(“The whole is not the same as the sum of its parts”)(*Metaphysica* 10f-1045a)。^①他说有些药物单独来吃是好的,但合在一起来吃就可能很有坏处。一栋建筑物虽然是由砖块等建筑材料组成的,但它并不是这些砖块的总和,“问题不仅在于它用什么东西制造起来,而且在于它以怎样的建构方式组合成整体”。沿着这个思路,在近代,逻辑学家穆勒区分了同质合成因果效应(*homo pathic resultant effect*)(如两个力的作用等于它的矢量和)和异质因果效应(*hetero pathic effect*),后者典型的例子是化学反应。他说,“氧和氢的性质在它们的化合物水中一点没有体现”。后来英国哲学家路易斯(G. H. Lewes)于1875年称这种性质为“突现”性质,即不能由其组成部分的性质与规律推出来的东西。这里有一个亚里士多德叫做“组合方式”而我们称之为结构的东西,它是组成部分的行为所不能完全加以确定的。

作为一个学派,“突现进化论”或“突现论”起源于19世纪末和20世纪初关于生命本质的活力论与机械论的大论战。这时,(机械的)还原论者继承了当时占支配地位的牛顿力学和化学原子论的世界图景,认为生命机体不是别的,只是服从某些物理规律的复杂机器,所有生命器官不过是它的部件,所有生命现象都可还原为物理现象、用物理学语言加以解释。争论的另一方是整体论。它的基本论点是,生命机体和那些惰性的非生命性质有本质的区别。与机械装置不同,它本质上是完整的、不可分割的系统。这个生命整体产生了它的部分所不具有的生长、自我繁殖、自我维持等性质,并且它的部分不能离开整体来动作和理解。人体中切下来的一只手已经不是手了,所以生命现象是不可以还原为物理化学现象来理解的。用整体论来反对还原论的主力军首先是以杜里舒(Hans Driesch)为代表的活力论。他们认为,生命机体之所以能表现出生命的本质性和目的性,是因为有一种生命

① Aristotle “Topics” (350 B. C.), Book VI, part 13. Translated by W. A. Pickard-Cambridge. http://evans-experientialism.freewebspace.com/aristotle_topics06.htm.

力或生命德行、生命原理。杜里舒从亚里士多德那里借用了隐德来希(entelechy),这种神秘的生命力只存在于生物中,驱动、指导或控制生物运行以及它的整体生长。当时他反对鲁克斯的胚胎发育机械论,鲁克斯认为,在胚胎中,每一个细胞都可以独立于邻近细胞、与邻近细胞无关地正常发育,而整个胚胎的发育则是各个部分分别发育的总和,正像一部机器由各个部件组成一样。杜里舒以棘皮动物海胆的胚胎做实验,发现无论从完整的胚胎或早期胚胎的一半或 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 开始,还是从两个不同胚胎融合起来开始,都可以发育为完整的幼体。为什么初始条件不同而结果却可以一样呢?为什么机器的一个部件竟能再生出完整的机器呢?对此,他认为,只有用隐德来希才能解释。这个争论一直延续到20世纪30年代。

当时,兴起了英国的突现论学派。在与还原论的论战中,他们坚决反对活力论所主张的“生命力”、“生命德性”、“隐德来希”或柏格森的“生命冲动”等神秘实体,他们认为,这些东西是从未发现又不可检验的非科学的东西,应该从科学中清除出去。虽然,拥有各种机制的生命系统的确像还原论者所说那样服从物理化学的规律,但是,生命系统又确实不是一部机器,它有着较低层次所不具有的突现性质和突现规律,解释这些生命特有的突现性质和突现规律的重担于是落到组织与层次这些概念上。从20世纪20年代开始,英国突现论学派有一系列非常重要的著作论证这个问题。主要是:布劳德(C. D. Broad)《心灵及其在自然界中的位置》(1925)、亚历山大(S. Alexander)《空间、时间与神性》(1920)、摩根(C. L. Morgan)《突现进化论》(1923)以及斯密特斯(J. C. Smuts)的《整体论与进化》(1926)。

布劳德的基本观点是,虽然各层次之间存在着“基本物质质料的统一性”,但“不同的物质分层有不可还原的基本性质,它是从低层次中突现出来的”。作为具有整体属性的有机体,要求不同层级对应不同层次的描述。“单层次的认识论和单层次的本体论都是不可能的。”这里有个重要思想是:不同层次有不同层次的概念、语言和描述,造成它们之间的不可还原性。

而斯密特斯则采取了更彻底的立场,将突现与组织层次推广到所有系统中去。他说:“每一有机体,每一植物或动物,都是一个拥有某种内部组织和一定程度的自调节的整体。不仅植物和动物是整体,而且宇宙中物质的自然排列,在某个有限意义上也都是整体;原子、分子及化合物也是特定

整体……一个整体是一个由部分组成的如此紧密的统一体或综合体,它影响到那些部分的活动与相互作用”。“整体的创造,更高层次的组织整体,以及一般地作为存在的特性的整体性,是宇宙的一种内在性质……各种等级的整体是自然的真实单元。整体性是宇宙自然在它的时间进程中的最显著的表达。它刻画了进化过程的轨踪。整体论是隐藏在这种进程中的内在驱动力。”^①这里包含了一种现在我们称之为通过混沌而有序的自组织思想。

贝塔朗非的“机体论”以及由此而来的一般系统论及其突现概念,可以说是在此基础上发展起来的。但是,我们在这里需要指出的是英国突现学派的几个缺点,以便在以后的讨论中克服这些缺点。它们是:(1)认为突现是自然界中的一种不必解释也不能解释的自然强加于我们的经验事实,我们只能以一种“对自然的虔诚心”来接受这个事实。^② (2)从部分突现出系统整体是一个离散的跳跃过程,中间没有什么步骤和连贯的过程可供我们追寻。(3)突现现象多少带有某种神秘性质,斯密特斯所说的“整体驱动力”就带有这种形而上的色彩。

▷▷ 4.1.2 突现的概念及其特征

1. 突现的第一个特征是整体性。系统科学的突现概念,正像历史上的整体论者所看到的那样,表明系统的整体不同于部分之和,系统整体出现了其组成部分或组成的前身所不具有的、甚至对于部分来说是没有意义的实体与性质、结构、功能和规律性,因而需要用高一级组织层次的语言来加以描述。如,氢氧化合而成的水出现了氧与氢单独存在时不具有的性质(如常温下是液体、不助燃、不可燃等等)。在人体生理学中,由细胞组成的整体器官,如眼、耳、鼻、喉、心、肝、胰、肺等等,各有独特的组织、性质、功能和运作规律,它们的性质与规律都是那些具有同样基因的细胞的集合所不具有的。特别值得注意的是,生命组成的基本元素,如氨基酸、核苷酸,是完全没有生命的,但一旦它们组成或形成为生命有机体,就获得了新的性质——

① P. Checkland, *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley & Sons Ltd, 1981, pp. 78-79. George J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic, p. 41.

② Alexander, S(1920). *Space, Time, and Deity*. Vol. 2. London: Maemillan. pp. 46-47. 转引自史坦福哲学百科全书 Emergent Properties 条目,第5页。

生命,即新陈代谢、变异、遗传、自我维生、自我修复等性质。人们的大脑活动也是一样,没有一个神经细胞、神经元可以思维、恐惧、愤怒、悲伤、痛苦,但它们在大脑中组成神经网络之后,就具有思想与感情等整体性质。这些突现性质是属于系统整体的,它对于组成部分来说是不存在的,甚至是毫无意义的。如温度、压力这些性质是属于热力学系统的整体性质,单个分子无所谓热,也无所谓冷,也无所谓受到压力;它只有运动速度和相互碰撞的性质。

如何解释系统突现这种现象,正是本章甚至是本书的任务。我们现在大概可以做如下的概括:这是因为系统元素组成系统的关系如此密切,以至于它形成了元素之间特定的模式(pattern)、构型(configuration)或组织(organism)与结构(structure)。一旦形成,它对组成元素就施加一种约束,改变这些组元的功能与行为,甚至改变它的性质,使它们整体地组织协调起来,作为整体而行动,并与其他事物以及环境发生关系。这时整体就变成一种新的实体,出现了组元集合所不具有的特殊性质,形成特殊的行为特征,受新的行为规律支配。因此,这就需要一种与描述组成部分不同的新的观察机制和新的语言来对其进行描述。这就是突现性质的第一个特征,即它的本体论特征。

2. 突现的第二个特征是新奇性或新颖性(novelty)。由于系统出现了其组分行为不具有的整体性质,因此,在进化过程中新颖性总是层出不穷,新事物总是不断地发生。由蚂蚁个体比较简单的行为突现出来的蚁群就有千变万化的集体行为方式和群体活动方式(各种形式的觅食、抬重物、搭桥、筑巢、养育后代、战争、殖民等等)。元胞自动机的生命规则非常简单,通常只用3—5条规则就可能描述单个元胞的行为。可是,它的组合却出现了各种各样的构型与模式,如“滑翔机”、“滑翔机枪”、“吞咽者”、“自我繁殖器”……甚至通用计算机也可由此而产生出来,并可模拟世界上所有的事物和所有的生命。这些都是新事物及其突现性质层出不穷的例证。这种突现性质层出不穷,与所谓“组合爆炸”有密切关系。原子这个层次系统的种类只有108种,这已经将不稳定的原子也包括进去了,可是由它们突现出来的分子在地球上就有700多万种。在分子中,四种核苷酸和20种氨基酸却突现出地球上的几亿种生物物种。

3. 突现的第三个特征是不可预测性(unpredictability)。即,突现性质

在出现之前一般是不可预测的,即使我们对它的组成部分的特征及其规律有完备的认识。当然,在系统的突现性质出现之后,我们有了相关的一些观察和经验事实,通过对它出现前的、行将成为系统整体组成部分的那些低层次元素及其相互关系的分析,可以指出这些元素怎样按照自己所在的低层次规律在特定的、在系统整体出现后才观察到的新的初始条件和边界条件下如何发生相互作用,从而对整体的出现及其突现性质做出某种回溯的说明。但这是一个解释问题,与预言或预测是不一样的。在系统整体出现前(这里指的是在我们的知识中,这类系统整体在这时还从来没有出现过),由于不存在系统整体的内部关系和外部关系,也不存在这些系统整体赖以出现的那些初始条件和边界条件,况且,从低层次的观点来看,这些初始条件和边界条件的出现在大多数情况下是非决定性的、偶然的、非本质的,因此,从这些将要成为整体的组成部分的元素及其相互关系中,是不可能预言(或预测)将形成的整体及其突现性质的。试想在宇宙大爆炸的最初几秒钟,虽然出现了宇宙所具有的各种基本粒子,但谁也不能从这些基本粒子及其相互作用中推论出今后会有地球,而地球又会有生命出现,从生命中后来又会突现出人类的心灵。生命是在地球距今 30 亿年前那种特定条件下出现的,从物质之间的一般化学反应的观点来看,要想像原始海洋中那些多肽与核苷酸能碰巧组成一个超循环,出现一种“遗传密码”来复制自己,对于化学变化的常规反应来说,完全是一个任意的、随机的、偶然的事件,其概率是几亿万分之一,我们怎么可以由此预言出有生命出现以及生命有何突现性质呢?当然在出现以后人们可以解释它,说根据化学反应它如何出现,但这是事后已经有了关于初始条件和边界条件的知识后的解释,而不是在没有关于初始条件的知识的情况下对新突现性质和突现规律出现的预言或预测。

突现性质的不可预测性,导源于拉普拉斯因果决定论的破灭和非线性系统动力学、特别是混沌学的兴起。前者得到了海森堡的测不准关系式的支持,后者指出了结果对初始条件的敏感性。有关这个问题,我们将在第 7 章中进行讨论。

4. 突现的第四个特征是具有某种意义的不可还原性。这里所谓某种意义的不可还原性,是指它不是完全不可还原,也不是完全可还原。所谓完全可还原性,是指系统的突现性质可以从分离地存在的或在其他组合中呈

现出来的组成部分的性质与行为及其规律性演绎地推出。这里主要包含以下三个层次的意思:第一,从本体论上说,高层次的系统不存在独立的实体、性质、规律和因果性。如果说这些实体、性质、规律或因果性存在,则它的作用完全可以用低层次组成部分的实体、性质、规律和因果性来加以解释,从而加以取代。第二,从认识论上说,说明高层次的系统现象的高层次理论,完全可以由说明这些系统组成部分行为的低层次理论、加上将高层次理论概念与低层次理论概念联系起来的桥接原理(bridge principle)演绎地加以推出,从而原则上可以由后者加以取代。例如社会学可以完全还原为生物学,生物学可以还原为化学;最后,一切科学终将还原为作为基础的物理学。运用物理学的规律,加上种种条件,就能够解释世界上的一切现象。我们认为,突现性质的第四个特征,就是它不具有这种完全意义的可还原性。关于这一点我们做如下说明:

首先,我们不是“独特论”者。虽然在第一点中我们讲过,由于突现,高层次的系统出现了低层次的元素所不具有的实体与属性、结构与功能及其特有规律,但这些性质与规律并不是凭空产生的,它是由低层次的组成元素经相互作用和动态的演变发展起来的。而在形成高层次系统之后,这些元素及其协同相互作用,依然对高层次的运作有某种决定作用。这种关系叫做上向因果关系或上向依随关系(Supereminence relationship)。例如,我们可以依据基因理论对大脑心理活动做还原的解释,对续子传孙的遗传活动做还原的解释。突现论与还原论是相容的。但是我们只要仔细观察和思考这个还原便会知道,这里并不是将人类心理活动归结为只是大脑的物理、化学和生理化学的活动,将心理学归结为生理学和生理化学。要解释一种心理活动,从它的组成要素的相互作用中寻找它的机理是必要的,但这对于心理活动的解释并不是充分的。而且这个解释是不是演绎推理呢?即使是一个演绎推理,在还原推理中我们也必须引进系统元素在低层次活动中所不具有的“特定初始条件”(如遗传密码),才能解释高层次现象(如遗传现象)。可见,这里的还原推理,不是全还原推理,只能说是部分的、有限的还原解释。至少像“遗传密码”、“计上心头”这种现象在高层次上的意义对于低层次来说,是一种初始的现象,是不能由低层次的元素及其相互作用的规律演绎地推出的。因此,突现论只承认必要而非充分的、局部而非完全的因果解释而不局限于逻辑演绎的还原,即是弱的而非强的还原。设 T_1 为低层

次理论(如物理化学理论), T_2 为高层次理论(如生物遗传学理论),则突现性质的理论还原就它可能用逻辑模型表达的限度内而论,并不表现为强还原: $T_1 \vdash T_2$,而表现为弱还原:

$$T_1 \& D \& A \vdash T_2$$

这里的 D 是指还原定义集,相当于亨普尔的科学解释中的桥接原理,即高层次的类词可以用低层次的语言来表达和定义。由于高层次的类是一种突现性质的类,它不可能包含于低层次的语词中,因此能否给高层次的类(如心理学中的“痛”这个类)一个低层次语词的统一定义,本身是个问题。如果不能找到还原定义 D,上述推理就不成立。这里的 A 是指特定的初始条件与边界条件(例如遗传密码),它在 T_1 中并不存在,可见,跨层次的还原只能是弱还原。而且还需注意,前面说到的上向因果和上向依随(高层次依随低层次),如果不是决定论的因果性和决定论的依随性,则这种还原推理在逻辑上说,一般地就不是演释推理。这就是突现的第一种不可还原性。

其次,要说明一种突现现象,除了还原的解释之外,还需要本层次的解释。例如,要说明生命现象,除了运用生物化学的规律来解释之外,还必须运用生存竞争与生态循环、遗传变异与自然淘汰这些生物学层次上独有的规律来进行解释。我们不妨称它为横向因果关系的解释。所以在科学体系中,总是高层次理论和低层次理论、宏观理论与微观理论同时并存的。例如经典遗传学与分子遗传学、社会学与社会生物学、经济学与心理学同时并存,而不可还原为某一门科学或物理学。试想,能有一位伟大的还原论经济学家,用物理学的概念来完全说明、至少从根本上说明华尔街股票交易所的活动吗?

第三,要说明一种突现的现象,除了运用低层次的规律和本层次的规律之外,还必须运用更高层次的规律来加以说明。例如,如果我们追问为什么萤火虫的化学能转变为光能的效率如此地高,几乎达到 100%,而划一根火柴点燃一根蜡烛,化学能转变为光能,其效率如此地低,几乎不到 10%,我们能用还原方法,“继续向里看”,从而得到解释吗?不能!因为萤火虫的这种能量转换,有个高层次系统、即萤火虫的神经系统的调节,导致萤光酶的作用。这就是说除了上向因果关系(upward causation)之外,还有一种下向因果关系(downward causation)起作用,它是高层次系统对低层次的组成

元素的一种支配、限制和影响作用。如果要问某个学生最近为什么这么烦恼,在进行心理分析的过程中,我们必须注意这种下向因果关系,即他在家庭的环境中、在学校环境中以及在社会环境中是否受了什么影响和刺激。这种思考就不是还原分析,也不是还原解释,而是一种脉络分析和扩展解释。下向因果关系对于突现概念具有重要意义。海里津说:“大多数的突现概念是如此模糊和弗晰,以致我宁愿将突现的概念表达为比较精确的下向因果性的概念”。^①

5. 突现的第五个特征是具有下向因果作用。下向因果关系的概念,最初是由宗教哲学家 A. 法勒(Austin Farrer)于1957年提出来的。他认为,高层次的行为模式会做出某种实际的工作,它是不能还原为低层次组分的作用的。他说:“在细胞的组织中,其分子的要素被吸引住了,仿佛被较大的行为模式迷惑住了似的,而细胞在动物的身体中也是如此。”^②神经生理学家、裂脑人的发现者和研究者 R. 斯帕里(Roger W. Sperry)也经常讲到高层次实体或高层次系统能“制服”它的组成实体的那种因果力。^③ 不过,最早精确地、不带隐喻地说明下向因果关系概念的则是心理学家唐纳德·坎贝尔(Donald Campbell)。他在1974年写的一篇论文《在层级地组织起来的系统中的下向因果关系》中写道:“所谓下向因果关系原理,就是处于层级的低层次的所有过程受到高层次规律的约束,并遵照这些规律行事。”^④那么,如何理解这种约束作用是作为一种因果关系而出现的呢?坎贝尔指出,“下向原因是一种自然选择和控制的间接变体,它是由进行选择的系统造成的原因,这些系统编织着直接物理原因的产物”^⑤ 或者用我们的话说,是下向因果力,它激活其组成元素的某种物理力和抑制其中的某些物理力,

① F. Heylighen, “Downward Causation”, Principia Cybernetica Web, 1995.

② Austin Farrer, *The Freedom of the Will, the Gifford Lectures*, 1957 (New York: Charles Scribner's Sons, 1958), p. 57.

③ Roger W. Sperry, *Science and Moral Priority: Merging Mind, Brain, and Human Values*. New York: Columbia University Press, 1983, p. 117.

④ Donald T. Campbell, “‘Downward Causation’ in Hierarchically Organized Biological Systems,” in F. J. Ayala and T. Dobzhansky, eds., *Studies in the Philosophy of Biology: Reduction and Related Problems* (Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1974), pp. 176; 179-186; 181.

⑤ *ibid.*, pp. 180-181.

从而影响其组成部分的行为活动与功能。坎贝尔运用白蚁和蚂蚁兵蚁中的颞骨结构来说明这个问题。这些蚁的颞部构型及其相应的肌肉的布置完全符合阿基米德的宏观物理学的杠杆原理。其铰链以最合适的距离发出最大的力,其中包含了组成肌肉与壳的蛋白质的结构特征,以及其中的分子与原子的或强或弱的协同作用过程。合乎杠杆原理是兵蚁的宏观有机体的操作规则,自然选择是造成这种颞部最优效率的原因,就像我们在上面说到的萤火虫的化学能转化为光能的最优效率一样。形成兵蚁颞部的蛋白质分布及其 DNA 模板的解释,需要杠杆原理以及有机体层次上的自然选择原理。显然,这是一种下向因果关系的作用及其对微观组成部分特征的说明。可以用下图来加以说明:

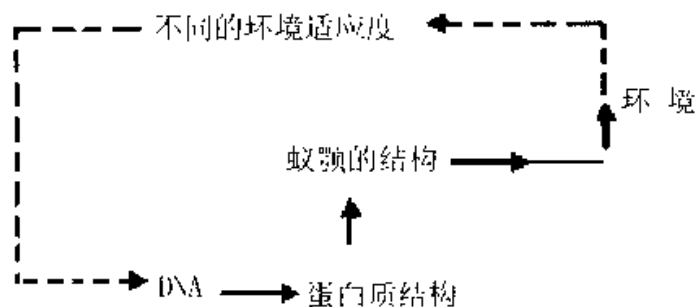


图 4.1 坎贝尔的上向因果关系和下向因果关系示意图

图 4.1 中实线为上向因果关系,虚线为下向因果关系。

英国哲学家卡尔·波普(1977)支持这种观点并对它做了如下的扩展解释:“我们说的下向因果关系,就是指一种较高层级的结构对它的次级结构起着原因的作用。理解下向因果关系的困难就在于此。”“我的意见是:下向因果关系有时候至少可以解释为作用于随机起伏的基本粒子上的选择。基本粒子运动的随机性(通常称为分子混沌状态)为较高一级结构的干扰提供机会。一种随机运动,当它顺应较高一级结构时就被接受下来,不然的话就遭排斥。”“选择压力就是这样通过选择对具体的生命机体产生一种下向作用,这种作用也许可以用由遗传联结的世世代代的漫长序列来加以放大”^①这就是说,高层次对低层次组分的选择力和控制力是下向因果

① K. 波普:《自然选择和精神的出现》(1977. 11)。见《自然科学哲学问题丛刊》1980 年第 1 期。

力的主要形式。基因突变是低层次结构的随机变化,而生存竞争和自然淘汰则是高层次规律,它对低层次系统(基因)的变化起支配或选择的作用。又如,生物物理学告诉我们,当一个人站立的时候,他的肌肉不断地进行收缩和放松的随机活动,只因为有了高层次即神经系统的控制,才有定向的活动。神经生物学家 R. 斯帕里对下向因果关系对大脑事件的作用做了如下说明:“意识的主观性质可以诠释为调节大脑事件的过程中具有因果力(causal Potency);这就是说,精神力或性质在大脑生物学中施加一种调节控制的影响”。^① 这种下向因果关系的作用,在社会生活中最为明显。支配社会中的个人行动的主要约束力不是生理的规律和心理的规律,而是社会的经济规律以及政治的、法律的、道德的社会规范和社会规律。个人的个性及其价值系统固然是基因的产物,但更多的还是来自社会和环境的影响。根据凯利(L. M. Keller)等人 1992 年发表的《工作价值:基因与环境的影响》对同卵孪生兄弟姊妹的一项研究,他们(或她们)的价值观念 40% 来自基因,60% 来自家庭、学校、国家文化、社会环境等社会系统。^②

我们再来看看无机界的一个上向因果关系和下向因果关系同时发生作用的例子:雪花晶体的六角形对称结构。这是一个整体的性质,是由组成它们的水分子的微观物理化学性质决定的。但一旦这种晶体形状已经形成,其中的分子就受到严格的约束,被严格限制于对称结晶形状所允许的位置上。如何解释这种情况?可以运用复杂动力系统的吸引子来解释:复杂系统在状态空间中的行为轨线可由表现动力规律的动力方程来表示。它的动力学一般是由一组“吸引子”所决定的,这些吸引子是这样一些状态空间区域:系统只能进入它而不能离开它。但系统的初始状态以及系统最终达到哪个吸引子是非决定性的。一些最微小的涨落都会导致系统走向一个吸引子而不走向另一个吸引子,但一旦达到某个吸引子,系统就丧失了它的自由度,不能走出这个吸引子,而被严格限定在那里。在这里,这个系统动力学就是支配分子行为的规律,吸引子就是雪花的晶体形状。正是这个动力学决定了可能的吸引子(六角形的、八角形的等等)。从分子的观点看,分子

① Roger Sperry: "Mental Phenomena as Causal Determinants in Brain Function", in *Consciousness and the Brain*, ed Globus, Maxwell, and Savodnik, p. 165.

② S. P. Robbins, *Organizational Behavior*(组织行为学), Prentice-Hall International, Inc. 清华大学出版社(英文版),1997, p. 175.

运动最终落入到那个吸引子是不可预测的,由不可控的和非决定性的外界影响所制约。但一旦落入特定的吸引子,这个系统方程的解就严格地支配了分子的运动。这种情况很像社会学中个人与社会的关系:社会是由个人组成的,理性、自利的个人相互博弈,产生了社会契约和社会规范,这是由个人所决定的,这个观点无论是方法论的个人主义还是其他社群主义都可以接受。但社会契约与社会规范是从个人相互作用中突现出来的一个整体,它一旦形成,便对个人的行为施加一种约束力,尽管这种约束力有时是个人没有预料到,甚至不想接受的。这就是突现的“异化”或异己的下向因果关系的一种最重要的特征。突现的下向因果关系符合一般因果作用的概念,但又有它的具体特点,它是高层次系统对低层次组分的一种结构约束力、调节控制力和环境选择力。

当然,并非系统的所有突现性质都同时具备上述五大特征。只具备第1、2特征的突现性质,称为弱突现性质;具备第1、2、3个特征的突现性质,称为标称突现性质,它是当代复杂系统理论的主要研究对象;而同时具备五大特征的突现性质,我们称之为强突现性质。本书对于突现与还原的观点是承认强突现,又承认弱还原,二者是可以相容的。

根据系统的标称突现性质,系统科学家们将它总结为一个原理,叫做系统整体性原理(System Holism Principle):系统整体具有其组成部分所不具有、并且不能根据部分的行为加以预测的性质。R. 亚科夫(Russell L. Ackoff)和R. 福勒尔(R. Buckminster Fuller)对这个原理做了一个比较明确的表述:“一个系统具有它的组成部分所不具有的性质,每一个系统组成部分具有作为整体系统所不具有的性质。”^①“整体系统的行为不能从它的组成元素或从整体中分离开来的组成元素的集合的行为中加以预测。”^②

▷▷ 4.1.3 突现的形式表达

尽管“整体大于部分之和”常常用来表达系统整体突然出现了其组成部分单独存在时所不具有的突现性质,但我们并不认为这是一个恰当的表

① Russell L. Ackoff, "Towards a System of System Concepts." Management Science 17. 11, pp. 661-669 (July 1971).

② R. Buckminster Fuller, *Synergetics*. New York and London: Macmillan CO, 1975, p. 3.

述。事实上,系统整体出现了部分所没有的性质,但整体同时又丧失了其组成部分单独存在时所具有的某些性质(例如氢气可燃,氧气助燃,而组成水后,既丧失了可燃性又丧失了助燃性),同时整体在某些方面又保留了组成部分所具有的性质(如质量、能量的守恒等等)。所以我们认为应该将整体与部分之间的关系表述为“整体不等于部分之和”,这也就是我们所说的系统整体性原理。正如我们在 3.3.1 中所指出的那样,一个系统有许多性质可以用变量 x_i 来表示,因而 n 种性质所构成的状态可以用 n 维状态空间表示,记作 X_L 。 $X_L = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。设系统 $\Sigma(K_1, K_2, \dots, K_m)$ 的组成部分为 $K_1, K_2, \dots, K_m$, 则整体不等于部分之和可以表述为:

$$X_L[\Sigma(K_1, K_2, \dots, K_m)] \neq X_L(K_1) \cup X_L(K_2) \cup \dots \cup X_L(K_m)$$

这个式子表现了整体性原理。这里要特别注意的是,这个不等式左边表示系统的状态空间 X_L , 有许多新的维度是等式右边的 X_L 维度所没有的。反过来说,表达组成部分的许多旧维度,在整合成整体后,在表述整体中也丧失了,这是一种状态空间的维度突现。它表现了整体性质的突现,即整体突然出现了部分所没有的性质。

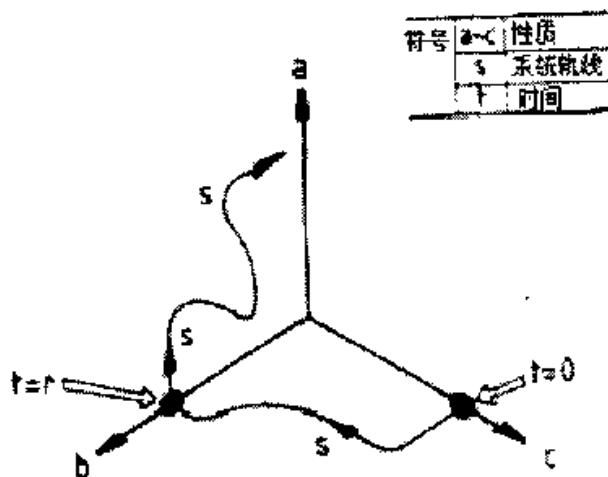


图 4.2 突现的状态空间表示

图 4.2 表示了突现、系统变量以及系统行为轨线之间的关系。这里 a, b, c 是系统的三个变量。设突现前,从 $t = 0$ 开始,系统在 (b, c) 的平面上运动,其行为 S 由 S 点的方向线(即行为轨线)来描述。当时间 $t = t$ 时, S 点在 (a, b) 平面上运动,它丧失了性质 c 而获得了性质 a , a 就是系统的突现性质。

突现除了有等式表达、状态空间表达之外,还有一种表达方式,就是逻辑的表达方式,它由依随突现的逻辑来加以描述。对这个问题的讨论已超出本书的范围。

4.2 系统的等级层次结构

4.2.1 突现与层次

突现与层次是一个问题的两个可以相互规定的方面。我们上面所定义的突现,不是指一般的所谓量变到质变,或简单的部分整合为整体。我们所指的是相互作用的部分与突现出来的整体处于不同的层级和不同的类型,从而显示出突现的各种典型特征。换句话说,层级之间的区别是整体与部分之间的区别达到最大化的表现。另一方面,我们这里所说的层次(hierarchy 或 Level)并非一般的分层(strata 或 Layer),而是突现的结果,是突现形成一个序列的表现。前面我们已经讲过,系统由于其结构对元素进行约束,以及元素之间的自组织动态整合,产生稳定的突现性质,于是构成了这个系统的实体或系统的个体。但这些系统的个体又可以作为元素或子系统通过相互联系、相互会聚和组织,形成新的突现结构和性质,并会出现更高一级的层次系统,由此而层层突现出新事物、新组织。下面是一个微观世界的层次突现图式:

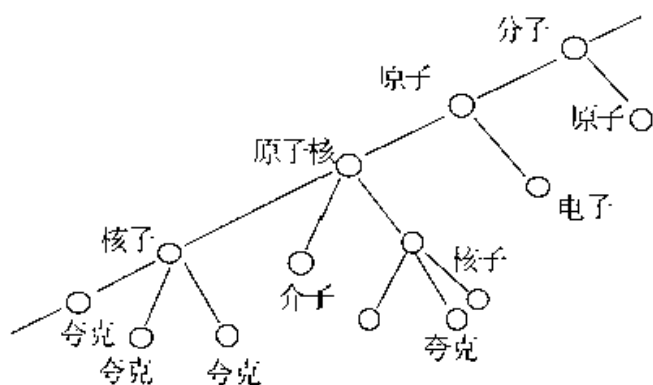


图 4.3 由夸克到分子的上部系统层次图

这里我们可以看到了五种物质层次系统(夸克→基本粒子→原子核→原子→分子)和七种物质形态(夸克、介子、核子、电子、原子核、原子、分子)

它们就是通过层次突现产生的多样的物质形态。

在生物世界中,这种层次关系更加明显。生物大分子组成细胞核、细胞膜、微粒体和线粒体,而后者组成细胞,细胞构成组织,组织构成器官,器官构成生物个体。生物个体组成群体,群体组成种群和群落,后者和它们的生存条件一起构成生态系统。

由上述分析和图解我们可以看出,所谓层次,是系统所属的那个类的一个系列,是系统类之间的一层套一层的关系。形式化地说,令 $L = \{L_i | 1 \leq i \leq n\}$ 为 n 个系统类的族,这里 L_i 为第 i 个系统层次,则:

第一,如果 L_j 中的所有系统 y 由 L_i 类中的某些系统 x 组成,则称 L_i 比 L_j 低层次,记作 $L_i \pi L_j$ 。即:

$$L_i \pi L_j = (\forall y) [y \in L_j \rightarrow (\exists x) \cdot (x \in L_i \& x \subset y)]$$

第二,所谓层次结构,就是层次之间按高低层次组成的有序结构。即层次结构 φ 定义为 $\varphi = (L, \pi)$ 。

▷▷ 4.2.2 系统的层次结构

从动态的观点研究系统的层次结构是目前的研究与英国突现论学派的一个根本区别。英国突现论学派所研究的问题是:“一种性质怎样能够是突现的呢?”(How can a property be emergent?)而复杂系统科学研究的问题是:“一种性质怎样能够变成突现性质呢?”(How can a property become emergent?)可见,前者是一种静态观点,后者是一种动态观点。从层次形成的观点看,我们是一个整体主义者,又是一个还原主义者。

图 4.4 是由詹奇(E. Jantsch)在《自组织的宇宙》(The Self-Organizing Universe)一书中绘出的(录自该书的图 24^①)。这里我们请读者特别要注意该书的一个副标题:进化的突现范式(Emerging Paradigm)的科学人文意义。可见,作者是用突现的观点研究进化,又用进化的动态观点研究突现。

图 4.4 的宏观演化序列表明,物质层次系统是由一个大系统整体(宇宙、总星系)通过不断的内部分化和自组织、从而不断增加内部的复杂性而形成的,这是一个在下向因果关系的作用下“自上而下形成”的:宇宙从大

① E. Jantsch, *The Self-Organizing Universe*. Oxford, Pergamon Press, 1979.

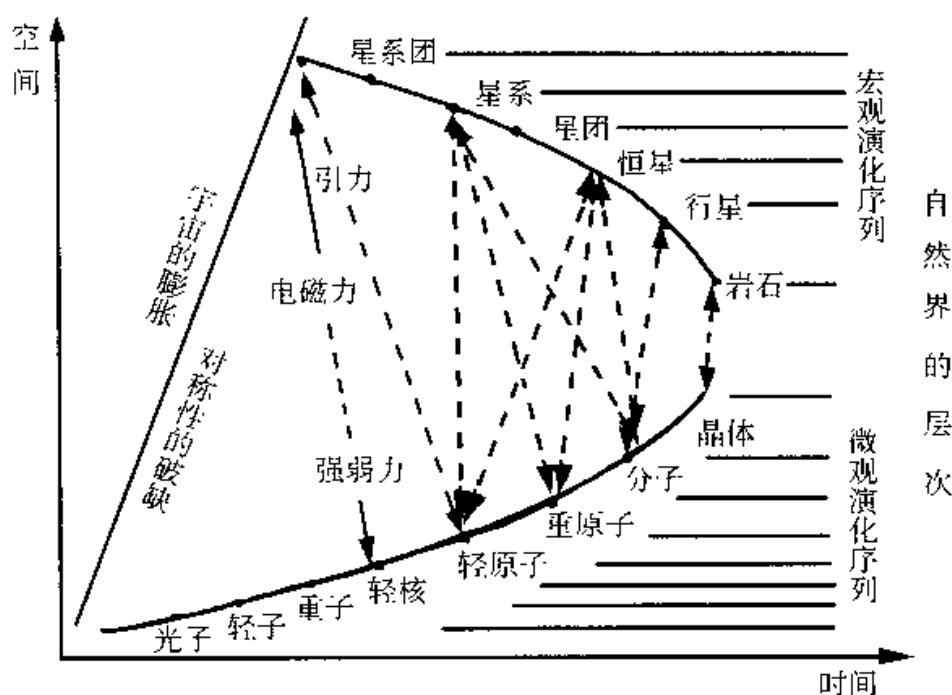


图 4.4 宇宙的宏观演化序列和微观演化序列

爆炸的混沌“原始汤”中分化出各种星系团,它们碎裂为各个星系;原始星系因自组织程度提高,分化出各种恒星和恒星系统,在发展中再分化出行星;在行星表面由于组织性、复杂性的提高再分化出生物圈(盖亚系统),生物圈中分化出物种种群,再从猿群中分化出人类社会(后面一段在图 4.5 中绘出)。对这个宏观演化序列及层次突现的形成,我们只有从下向因果关系、在脉络解释中才能理解。在这个意义上,我们是一个整体论者。

再来看图 4.4 的微观演化序列。物质层次主要是通过不断合成、整合,通过不断自会聚和外向自组织,突现出愈来愈复杂的系统而形成的。这是一个基于上向因果关系“自下而上”形成的。例如,基本粒子合成原子核,原子核和电子合成原子,原子合成分子,生命大分子再通过超循环和自催化合成细胞、器官和生命个体等等(后面一段在图 4.4 中标明)。在这个意义上,我们是一个还原论者,着重从微观还原分析中对这些系统的形成做还原论的解释。

但是,宏观演化序列和微观演化序列及其层次突现并不是互不相关的。它们紧密联系着,相互依存和相互对应着。宏观演化是微观演化的大舞台和大环境,而微观演化则是宏观演化的基础与内部机理。如果不是宏观演

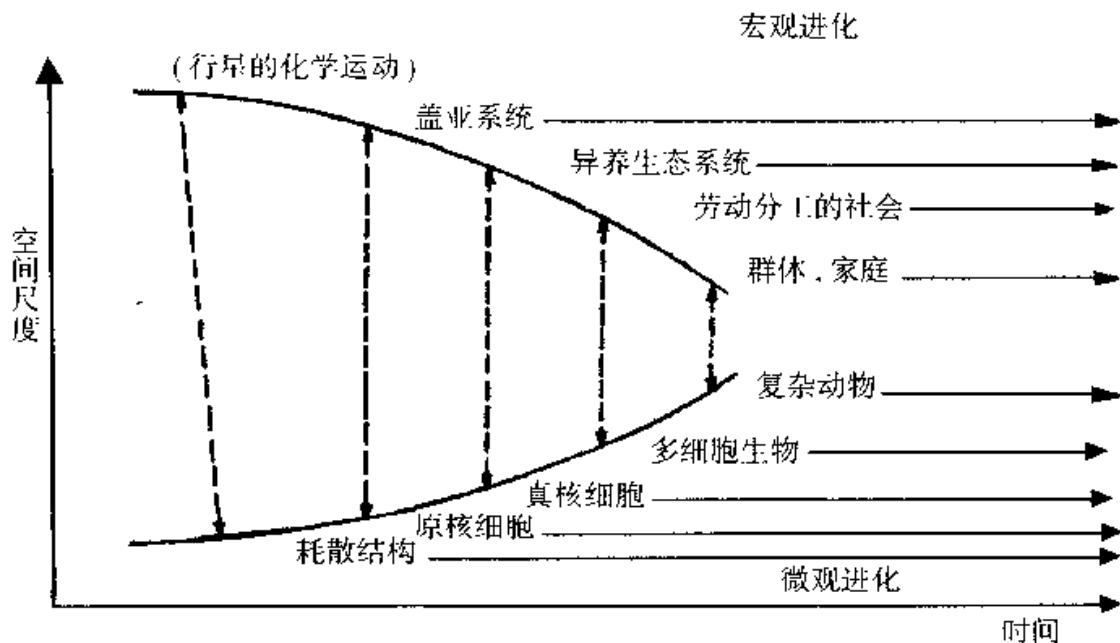


图 4.5 地球上的生命史上的宏观系统和微观系统的共同进化

化进到某个阶段、恒星内部引力收缩、造成几十亿度的高温条件,就不会有微观上合成重原子核的演化,而没有这个过程,行星以及生物圈的形成是不可能的。所以,自然层次的突现不仅仅是微观系统的聚合过程,也不只是宏观客体的分化和复杂化过程,而是宏观分化与微观整合的协同作用过程,宏观演化序列和微观演化序列的协同进化过程。这种宏观结构与微观结构的协同进化可以从图 4.4 和图 4.5 的虚线联系看出来。可见,整体论与还原论是相容的,是相互联系的。在用系统方法看待和分析层次与突现时,我们既是整体论者,又是还原论者。

▷▷ 4.2.3 系统层次的基本特征

系统的层次结构有两个显著特点:

1. 特定层次系统的尺度与它的结合能成反比。即除天文方面的层次外,系统的层次越深,尺度愈小,它的结合能愈大,结合能与被结合元素的静能的比例也愈大,它们结合得就愈牢固。如果不这样,层次的结构是不可能的。设想如果杀死我们身体内的细菌的温度或能量(就像人们因病发高烧来杀死细菌或病毒一样)就足以分解高分子,小分子,甚至足以分解其中的原子和原子核,也就不会有低层次系统的存在。所以这个关系可以看做是系统层次的一个存在定律或是一个经验定律,它可以表述为:自然界特定层

次的物质系统的尺度与它的组成元素之间的结合能有反比关系。设系统的尺度为 L , 结合能为 E , 则有:

$$L \cdot E = K$$

这里 K 是一个常数域或数量级, 约等于 10^{-7} 厘米电子伏。

为了检验这个定律, 我们列表如下:

表 4.1 物质系统的尺度与结合能的关系

层次	$L(\text{cm})$	$E(\text{ev})$	$L \cdot E$	结合能与被结合元素静能比 (E'/m)
单细胞	10^{-4}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-11}
分子	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	10^{-9}
原子	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	$10^0 \sim 10^1$	10^{-7}	3×10^{-5}
原子核	$10^{-12} \sim 10^{-13}$	$10^5 \sim 10^6$	10^{-7}	2×10^{-3}
基本粒子	$10^{-13} \sim 10^{-16}$	$10^8 \sim 10^9$	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	1
夸克	?	?	?	?

这个关系是美国物理学家 V. F. 韦斯科夫 (V. F. Weisskopf) 在 Knowledge and Wonder (1996) 一书第 7 章中提出来的, 他称这种关系为量子阶梯。^① 而公式 $L \cdot E = K$ 以及表 4—1 的经验数据则是该书作者收集、整理和概括的。诺贝尔经济学奖获得者 H. A. 西蒙于 20 世纪 60 年代将层次结构的这种性质称为近可分解性 (Near Decomposability), 并将它推广到社会组织系统和经济系统。他说: “对于层级系统, 可以区分子系统之间的相互作用与子系统之内的相互作用——即这些子系统的部件之间的相互作用。不同层次上的相互作用的强度可以有而且往往有数量级的差别。在正式组织中, 一般说来, 属同一部门的两个雇员之间要比属于不同部门的两个雇员之间有着更多的相互作用。在有机体中, 分子间力一般比分子力弱, 分子力比核力弱。”^② 因此系统中的子系统及其内部结构由于内聚力比子系统

① Victor F. Weisskopf, *Knowledge and Wonder* (Revised Edition). Doubleday, 1996. 中译本: [美] 为 V. F. 韦斯科夫著《人类认识的自然界》, 科学出版社 1975 年第 1 版, 第 131 页。

② H. A. Simon, (1962) “The Architecture of Complexity”, in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001. p. 549.

之间的相互作用要强,因此就有某种相对独立性,所以叫做近乎可分解性。这就是我们研究问题时可以进行理想化、孤立化和还原的一种根据。不过,在近似地研究子系统的短期行为时可以这样做,但在研究高层次系统时,子系统之间的相互作用是绝对不能忽略的,所以,我们需要正确地看待近乎可分解性的方法论意义。不过一般说来,层级结构系统的内层比外层更加巩固和稳定,或如西蒙说的:“在任何层次上,单元之内的相互作用比同一层次上单元之间的相互作用更迅速,更强烈”。这是系统层次结构的一个基本特征。系统哲学家 E. 拉兹洛于 1973 年将它推广为对除天文等级外所有层次都成立的一般系统规律,他写道:“低层次系统有较强的结合力(如核力与电力结成原子结构),而高层次系统明显地是由较弱的结合力造成的(有机体有化学键,群体与生态系统的结合则依靠位置的结构,共生行为是由基因编码造成,社会系统的结合通常要求有价值、规范和法律等)。”^①

2. 系统的形态多样性与该系统在自然界的丰度成反比。

这个关系可以表述如下:系统层次愈高,该层次物质系统在宇宙中的丰度愈少,而其结构功能的多样化愈大。

首先,我们讨论宇宙中各层次物质系统的分布和丰度问题。从宇宙大爆炸到形成作为人类生存条件的地球,从自由状态的基本粒子发展到人脑,这是一个物质系统由简单到复杂、物质结构层次由低级到高级的上升发展过程。这里所谓高级层次和低级层次,是按照第 1 节的层次关系定义的。若 $S_1 < S_2$, 则 S_1 是比 S_2 低级的层次。自然界具有由低级发展到高级的趋势。但并不是宇宙中所有的物质都参与这种由简单到复杂、由无序到有序、由低级到高级的前进上升的全过程。物质的层次愈高级,该层次物质系统在宇宙中的丰度愈小。在宇宙大爆炸过后,只有一小部分物质形成氢气云。在氢气云中,只有一小部分形成恒星;而恒星在其演化的过程中,只有一小部分的氦和氢转化为较重的元素(它的丰度只占氦、氢总量的 1%);这些元素只有一小部分被抛射到空间,而被抛射出来的物质又只有一小部分聚集成靠近恒星的行星,而行星中也只有极少数具备产生生命的条件,而在这些具备条件产生的行星中,又只有极小部分的物质变为生命物质(它的

^① Ervin Laszlo, *Systems Science and World Order*, Pergamon Press, 1983. p. 117.

丰度占银河系总质量的 10^{-19}), 而生命物质中最后又只有很小的一部分演化为人类。一部物质发展史向我们证明: 只有一小部分物质参与了由低级到高级发展的全过程, 物质系统的丰度与高级程度成反比。其所以如此, 在后面我们将知道, 是由封闭系统的熵增规律决定的。

但是在某一层次上的系统多样性的情况正好相反。这里所说的多样性, 指的是同一层次的系统的结构功能种类的多样性。由于高层次系统是由低层次系统经组合而成的, 因此, 高层次系统的多样性不但取决于低层次系统的多样性, 而且取决于低层次系统之间结合方式的多样性。我们在第 3 章图 3.1 中已经直观地看到这种情况, 而在第 8 章中我们将指出“随着系统元素增加系统关系复杂性加速增长”(即“组合爆炸”)。例如, 在 4.1.2 中我们已经说过, 原子这个层次的系统种类只有 108 种, 这已经将不稳定的原子种类包括进去了, 可是分子的种类就多得多。根据我国化学家徐光宪教授在《物质结构》一书中所做的统计, 现在已知的分子就有 700 多万种。单是有机体的物种曾经在地球上存在过的就有 10 亿种, 而这也不过是由核酸基因编码所决定的可能的物种中极小的一部分。至于可能的生态系统的数目, 更是不可想像的。我们的世界, 不是一元化的或二元化的世界, 而是多元化的世界。

▷▷ 4.2.4 系统层次结构的必然性

我们已经讲过, 系统经过演化而形成层次结构以及这些层次结构的基本特征。现在我们的问题是: 为什么系统的演化不是从最简单的元素直接自会聚、自组织为极为复杂的系统呢? 也就是说, 为什么系统演化会朝着增加等级层次结构的方向发展呢? 关于这个问题, 西蒙于 1962 年,^①以及著名系统科学家和生物学家罗森(R. Rosen)^②于 1970 年, 运用广义进化论和概率论分别做了很好的分析和论证。西蒙用钟表匠组装钟表做比喻。假定甲、乙二人都用 1000 个零件组装钟表, 每装 100 个零部件, 有一次受干扰的

① Herbert A. Simon, "The Architecture of Complexity", Proc. Am. Philos. Soc., pp. 106-167, 1962. in G. S. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001. pp. 541-559.

② Robert Rosen, "Subunit and Subassembly Process," J. theor. Biol. (1970) 28, pp. 415-422.

机会,使组装工作需要重头来做。甲分三层进行组装,每个部件由10个零件组装而成,他必须完成111个分部组件。而乙不分层,一气呵成,直接将1000个零件组装成钟表。西蒙计算概率得到的结果是:乙完成一只钟表要用的时间平均为甲的4000倍。他由此导出一个结论:“如果存在着稳定的中间形式,复杂系统由简单系统(分层)演化而来的过程要比不存在稳定的中间形式的情况快得多。在前一情况下,复杂系统结果将是等级层次性的”。这是因为前者自会聚,自组织的失败不会



西蒙(H. A. Simon, 1916—2001)

破坏整个系统,而只是分解为低一层次的子系统,而后者的自组织如果失败,就要一切从头做起。在4.2.3中我们已经指出,由于结合能与尺度成反比的规律决定了这种“稳定的中间形式”是存在的,所以,西蒙的结论所要求的条件是具备的。这种情形直观上也是明显的,用碳、氢、氧、氮等元素原子直接合成胰岛素的成功概率几乎等于0,而分层合成(先合成无机分子,再合成有机小分子,然后由氨基酸小分子再合成G链和P链,最后合成胰岛素)成功的概率就较大。大家知道,我国首次合成胰岛素,指的就是人工合成G链和P链。因此,在演化过程中产生多层次结构物质系统的概率,要比产生无层次结构物质系统的概率大得多。于是自然选择就决定了现实世界即自然界有一个层次结构。R. 罗森于1970年做了一个精彩的数学证明,证明系统存在层次的必要性。现在让我们来考察这个数学证明。

设要组成复杂系统的基本元素有 M 个。现在分层组成复杂系统,经 N 个组合阶段,组成 N 个层次和 1 个基本元素的复杂系统 S_N^1 。

再设在第 i 个组合阶段中组成的每个系统 S_i 有低一级的子系统 r_i 个。

又设每个元素(或每个子系统)能结合到系统中的平均概率为 P 。这里 P 不会是1,因为结合过程受到环境的干扰和破坏,使有些元素不能结合到系统中。

现在,用 M 个基本元素组成系统,在第 i 阶段上能组成多少个系统 S_i ? 设 S_i 的个数为 V_i ,则:

$$V_i = \left(\frac{M}{r_1 \cdot r_2 \cdots r_i} \right) \cdot P^{r_1+r_2+\cdots+r_i}$$

这里 $r_1 \cdot r_2 \cdots r_i$ 为系统 S_i 所含的基本元素个数。

在第 N 阶段中,用 M 个基本元素组成为系统 S_N 的数目为 V_N ,这里

$$V_N = \left(\frac{M}{L} \right) P^{r_1+r_2+\cdots+r_N} \quad (1)$$

这是通过分层组合的方法而得到的系统 S_N 的数目。

现在我们不用分层组合的方法,而从基本元素之中直接形成复杂系统 S_N ,此时形成 S_N 的数目为 V'_N 。这里:

$$V'_N = \left(\frac{M}{L} \right) P^{r_1 \cdot r_2 \cdot \cdots \cdot r_N} \quad (2)$$

这两种组合方法在形成最终系统的数目上差别是非常大的。我们举个例子来看看:假设我们有基本元素 10 亿个,即 $M = 10^9$,假设元素组合的概率 P 为 0.99,又假设我们的最终系统 S_N 由 1000 个元素组成。

用分三层组合的方法,每层组合 10 元素(或子系统),则我们能得到的 S_N 的数目为:

$$V_N = \left(\frac{10^9}{1000} \right) \cdot (0.99)^{10+10+10} = 739000$$

而如果用不经中间阶段的直接组合的方法,我们得到的 S_N 的数目为:

$$V'_N = \left(\frac{10^9}{1000} \right) \cdot (0.99)^{1000} = 44$$

可见,由元素组成多层次系统的成功概率比直接组合的成功概率大得多,自然淘汰决定了系统演化朝着增加等级层次的结构方向发展。

这是有关突现以及层次突现的进化机制和概率机制的初步分析。对突现和层次的控制机制、自组织机制和适应性机制的分析,我们将在本章以下各节以及第 8、9、10 章中进行讨论,这些讨论虽然没有直接谈及这是突现的机制,但事实上与此密切相关。

最后,我们用西蒙的话对本节讨论的问题做一个小结。西蒙将系统的层级结构理论总结为系统层级原理(System Hierachy Principle):“复杂自然现象是在层级中被组织起来的,其中每一个层次都是由若干个整合系统建

构起来的。”“自然界之所以在层次中被组织起来,那是因为对于任何系统,甚至是中度复杂的系统,层级结构提供了最可行的形式。”^①在控制论方面,A. 奥林(Arvid Aulin)将系统层级理论总结为必要的层级定律(Law of Requisite Hierarchy):“调节与控制能力的缺乏,可以在一定程度上用增加组织层级来补偿。”^②或者说控制能力越弱,就越需要必要的组织层级。

►► 4.3 通讯与信息

▷▷ 4.3.1 通讯(communiction)或信息的传输(transmission of information)

人们认识物质世界的历史包括认识它的实体方面、能量方面和信息方面。16、17 世纪人类在认识物质实体方面取得了重大突破,认识到一切物质都是具有质量的实体,并且质量是守恒的;19 世纪能量定律的发现、20 世纪初爱因斯坦相对论以及质能公式即 $E = mc^2$ 的发现,标志着人类对能量的认识有了重大突破。但是,认识到物质世界、事物系统或系统行动者还有第三个基本因素或第三个基本方面,只是近几十年来的事。一直到第二次世界大战以前,人们还以为,要认识某个物质客体,只要认识了它的物质材料,认识了它的能量形式,就已经足够了。但是当人们研究通讯系统时,就发现问题并非如此。我们来考察一下一般通讯系统的模型:

在图 4.6 中,信源就是消息发送源,例如电视发送台被发送的对象(自然图像、文字或音乐等)就是发送源。编码器械将消息变换为电压信号,并对信号进行加工处理,经过交换、编码和调制,变成可以通过信道的信号,例如电视发送台光电摄像管将光现象变换为信号再调制成无线电信号。信道是传递信号的通道,它可以是有线信道(例如有线电话的信道),也可以是无线信道(例如电视信号的信道),也可以是自由空间(例如传播声音的信道)。干扰源又叫噪声,是消息信号传播过程中外界混入的干扰。译码器

① H. Simon, "The Organization of Complex Systems". in Howard Patter (ed) Hierarchy Theory. Braziller, New York, 1973.

② Arvid Aulin, *Cybernetic Laws of Social Progress*. Pergamon. Oxford., 1982, p. 115.

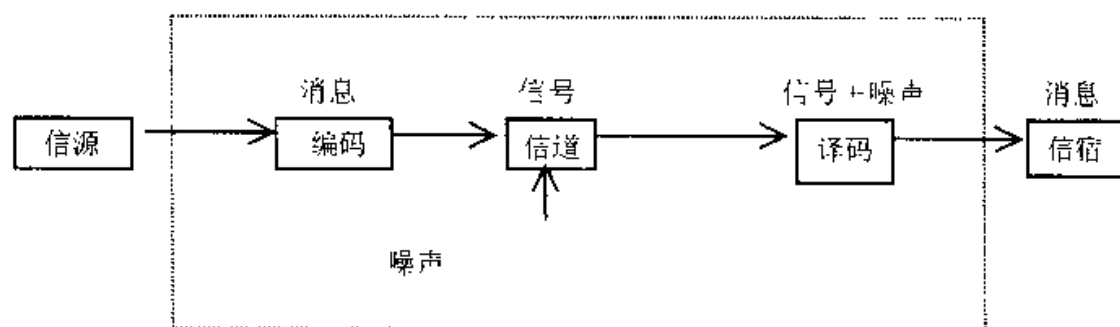


图 4.6 一般通讯系统模型

是编码器的反变换器,在电视接收的例子中就是一部电视机,它将电视信号变换为图像、声音等等。信宿就是消息的接收者,例如看电视的人等。如果看电视的人要将他看到和听到的消息(例如大风警报)讲给别人听,电视屏幕或明或暗的交替变化模式就又编码为视网膜反应模式,再变为神经脉冲形式,又变为唇舌运动模式,再变成声波模式,再变为听者的鼓膜、耳蹬骨、耳蜗的变化,才为听者所接收。

我们现在要问,通讯系统传输的是什么东西?大家知道,火车传输的是旅客或货物,高压电网传输的是电能,那么通讯系统传输的是物质实体吗?不是!摄像管前面的演员并没有被运送到电视机前面和观众见面。维纳说:“从线路的一端到另一端之间不需要任何物质(实体)的运动。”^①通讯系统传输的是能量吗?当然消息的传递要消耗一定的能量,不过所需的能量可以是微不足道的,而且通讯系统传输的目的根本不是能量。那么这里传输了一些什么?我们说,传送的是信息,它是物质客体的第三因素。所以维纳说:“机械的大脑不能像初期唯物论者所主张的‘如同肝脏分泌胆汁’那样分泌出思想来,也不能像肌肉发出动作那样能以能量的形式发出思想来。信息就是信息,不是物质也不是能量。不承认这一点的唯物论,在今天就不能存在下去”。^② 通讯与控制,要求我们认识世界第三要素,即信息。

信息与物质、能量到底有何区别与联系呢?一般说来,信息的传输不遵守守恒原理。一个老师一辈子将他的知识(信息的一种形式)传播出去,广为学生所知,但他并不因此损失了信息。当然信息与物质和能量是有关系

① N. 维纳:《人当作人来使用》,《维纳著作选》,上海译文出版社1978年版,第85页。

② N. 维纳:《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,郝季仁译,科学出版社1963年版,第133页。

的,信息需要物质作为它的载体;它的传输要消耗能量,但同样多的物质,却可以载上数量非常不同的信息。每克古代楔形石板,只能载有约 10^{-2} 比特信息,每克纸张却可以载有 10^3 比特信息,一克普通录音磁带可载 10^6 比特信息,而一立方微米直径的生殖细胞就已经贮有 10^9 比特的信息。当然,信息传递需要消耗能量,但传递的信息量决不能用它的能耗来衡量,所以运用研究物质与能量的概念与工具,不能解决关于信息的问题。

说传输的不是物质实体也不是能量,而是世界的第三个要素,这只是一种否定性的说法,并没有正面向我们说明被传输的“消息”或“信息”本质上是什么。根据我们在 3.3 中所讲的,其所传输的是系统的一些状态的序列,无论是电压状态变化序列还是电磁波状态变化序列,视网膜状态变化序列或者是唇舌的状态序列,这些状态序列有某种共同的东西被传输过来,我们称之为“信息”。而“消息”不过是状态变化序列在不同系统中的耦合,它从一个系统的输出端耦合到另一个系统的输入端,而“通讯”就是通过这种耦合,使信息在不同系统中的传输。

系统科学在讨论信息或通讯时,撇开信息的内容与意义(如演员表演或大风警报之类),把它看成是一般系统的状态之间的某种序列关系,它可以在不同系统之间进行耦合与传输。这样,信息或通讯的概念最初只限于人与人之间的通讯,现在随着控制与信息的一般概念的建立,系统科学的跨学科研究,人与人的通讯就推广到人与机器的通讯以及机器与机器之间的通讯,进而是物与物之间、细胞与细胞之间、昆虫之间、动物之间甚至植物之间的通讯。总而言之,是系统与系统之间、特别是复杂系统之间的通讯。这样,系统科学和复杂系统研究便有了一个重要问题,即信息问题,特别是信息的概念、度量与理论问题需要解决。

▷▷ 4.3.2 信息量的单位

信息这个概念到底指的是系统状态之间的一种什么样的序列呢?这个序列最初指的是人与人之间的通讯,在通讯中给信宿带来新的内容,新的消息,于是信宿的消息的可能世界就“消除了某种不确定性”。例如,如果有人来广州找他的弟弟,而不知道他弟弟的住址,于是就有许多可能的情况,可能在工厂、银行当职员,甚至还可能在街头当乞丐,当然也可能在大学读书,可能在中山大学,也可能在华南师大……他处于一种疑惑不定的状

态。当人们告诉他,他的弟弟在华南师范大学时,他获得了信息,消除了某种不确定性。当然他仍有不确定性,当人们再告诉他,他弟弟在华南师大公共管理学院哲学所时,他又获得了信息,进一步消除了不确定性。这种不确定性的_{大小},以及消除不确定性的_{大小},就是信息量的_{大小}的可度量的方面。

日常会话的经验告诉我们,消息(message)越长,或某信息系统的状态序列越长,其中包含的信息量就越大。不过要有一个条件,就是这个序列要尽可能删去重复、删去废话、删去已经知道的消息之后,才会成为信息的度量。所以经尽可能缩短的表达之后,消息的长度就是信息量的度量。

消息以各种各样的形式表达出来,如汉语、英语、数学符号、激素、神经活动、密码等等。将它们加以比较,求出一个统一单位,便是定量信息论的起源。如何对不同形式的消息的长度进行比较与计量呢?我们需要找出一个标准的数码。最简单的电讯密码只有二个符号(点一划),电路中的继电器只有两个状态(开—关),神经元的反应只有两种形式(兴奋—抑制),于是起源于电信工业、电子工业的信息计量标准单位便是二进制单位。从两种可能状态中得到一个确定状态所得到的信息量为_一比特(bit)。例如抛一个钱币得到正面,有₁比特信息。在上述一个人寻找他弟弟的案例中,如果他弟弟在华师读书还是在中大读书都有同样的概率,有人告诉他,他弟弟在华师读书,他便得到了₁比特的信息。

▷▷ 4.3.3 信息量的测量

在4.3.1中,我们已经讲过,消息量是用一个状态的序列来表示的,将状态序列看做是一个集合,不同状态数看做是该集合的元素,则该集合的不同元素的数量就叫做该集合的变异度(variety)。例如英文字母的集合有26个不同字母,这个字母集合的变异度就是26。变异度是表达信息量的基础。一个集合,一个状态序列,如果不包含不同组元,它就不可能表达信息和信息量。一个只能说a(啊)的哑巴小孩,你问他饿了吗,他说“a”,问他吃饱了吗,他又说“a”,问他是否要睡觉了,他又说“a”,这里“a”是不能表达信息的。变异度是一个很重要的问题,以后我们还要进行讨论。

现在我们要讨论的问题是,多于二个组元,即多于2个变异度,所传送的信息量怎样还原为比特数?这个问题可以通过对变异度进行二进制编码

来解决。请看下面的例子：

假定有人只用8个英文字母(A—H)来传递信息,出现每一个英文字母有多少信息量?要用几个二进制数字表示?这里相关的组元数为8,将8个字母按1与0的二分法进行分组,表列如下:

表4.2

	A	B	C	D	E	F	G	H
每一次分组	1	1	1	1	0	0	0	0
每二次分组	1	1	0	0	1	1	0	0
每三次分组	1	0	1	0	1	0	1	0

三次分组就把这8个字母分尽了。每一个字母需要三个二进制数字表示:如A为111,B为110,C为101等等。即每一个字母的信息量为3比特。

推而广之,这不过是用二进制的比特数来表达变异度的问题而已。

设有 m 个符号(变异度)用来表示信息,问 m 的信息量,就是要问可以用多少个二进制符号来表示它,设这二进制符号串有 H 个,这里 $m = 2^H$,故 $H = \log_2 m$

例如,26个英文字母中每个字母含信息量 $H = \log_2 26 \approx 4.70$ 比特。

本来信息就是对不确定性的排除,排除了多少可能状态就应该说它可以有多少信息量。掷一骰子,有6种可能状态,掷得6点的一面,应该说,它的信息量有6。英文26个单字,出现一个A,就排除了26种可能性而确定了A,应该说信息量为26。为什么不这样计算呢?这除了有历史的起源之外,是因为用 $\log_2 26$ 或 $\log_2 m$ 来表示有一个好处,就是它的可加性:两个消息加在一起的总信息量等于每个信息单独存在时各自信息量之和,即

$$\log_2 (m_1 m_2) = \log_2 (m_1) + \log_2 (m_2)$$

符号出现的可能状态的数目即它出现的概率 p ,自然与符号或相关组元的数目成反比,即 $m = \frac{1}{p}$ 或 $p = \frac{1}{m}$ 。只有两种状态,其中有一种出现的概率为 $\frac{1}{2}$,英文字母有26个,其中某个出现的概率为 $\frac{1}{26}$ 。所以 H 可表示为

$$H = \log_2 m = \log_2 \frac{1}{p} = -\log_2 p。$$

这个公式是在申农信息论提出之前,由哈特莱(Hartley)在1928年提出来的,它有很多方便之处。信息量 H 的值随 m 增加,而且是可加的,这符合我们直觉的认识:两个加在一起的消息携带的信息等于分开时的两个信息之和。

但是 $H = \log_2 m = -\log_2 p$ 的表达式有个缺点,就是它假定在消息串中,每一个符号出现的概率都是相等的,因而出现的信息量是相等的。实际情况往往并不是这样。对于由 S 开头的英文单词来说,在 S 之后出现元音字母为 e, a, i, o, u 的概率远大于出现辅音字母如 b, d, f 等的概率,一个铸制不均匀的骰子每一面出现的概率就不是相等的。这个公式还假定,每一个消息单元所使用的符号的数目都是一样的,即 m 为不变量;如果不是这样,则消息序列的平均信息量便应该用加权平均式来表示,即

$$H = -(P_1 \log_2 P_1 + P_2 \log_2 P_2 + \cdots + P_n \log_2 P_n)$$

$$\text{即, } H = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i$$

其所以要采取加权平均,是因为在各个分量 P_1, P_2, P_n 的概率中(其中 $P_1 + P_2 + \cdots + P_n = 1$), P_i 的权重正好就是 P_i 。

这个公式归功于维纳(1948)与申农(1949)的研究。

而 N 个消息序列的总信息量为:

$$H = -N \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i$$

当然以上的表述是对于信源的不确定性的消除来说的。如果在信息的传递过程中,这种不确定性完全没有被消除,则我们称 $H = -N \sum P_i \log_2 P_i$ 为信息熵,这时信宿所获得的信息量为 0。而如果信宿在收到信源到达的信息之后对于信源仍有某种不确定性没有被消除,则它所获得的信息量为信源信息量与信宿收到信源信息后信源对它仍具有的不确定性之差,即

$$\begin{aligned} I(X_1 | X_2) &= H(x_1) - H(x_1 | x_2) = -N \sum P_{1i} \log_2 P_{1i} - (-N \sum P_{2i} \log_2 P_{2i}) \\ &= N(\sum P_{2i} \log_2 P_{2i} - \sum P_{1i} \log_2 P_{1i}) \end{aligned}$$

这里 X_1 表示信源, X_2 表示信宿, $I(X_1 | X_2)$ 为 X_2 从 X_1 接收到的信息量,为信源信息熵, $H(x_1 | x_2)$ 为 X_2 收到信息后 X_1 对它仍具有的不确定性。

现在仍用 4.3.2 的例子,假定问讯人 X_2 (信宿)向知情者(X_1)询问 X_2 的弟弟在哪里,假定其不确定性是在广州的概率 P_1 为 $\frac{1}{2}$,在华南师范

大学的概率 P_1 也为 $\frac{1}{2}$, 在公共管理学院的概率 P_3 也为 $\frac{1}{2}$, 而在哲学所的概率也为 $\frac{1}{2}$, 则知情者 X_1 的信息熵或信息量为 $4\log_2 \frac{1}{2}$, 若 X_1 只告诉 X_2 他弟弟在广州, 则 X_2 得到的信息量为 $4\log_2 \frac{1}{2} - 3\log_2 \frac{1}{2} = \log_2 \frac{1}{2}$, 而若 X_1 告诉 X_2 他弟弟在广州华南师大, 则 X_2 得到的信息量为 $4\log_2 \frac{1}{2} - 2\log_2 \frac{1}{2} = 2\log_2 \frac{1}{2}$ ……如此类推。

▷▷ 4.3.4 信息与熵

我们首先要讨论清楚熵在物理学中和在系统科学中的含义, 然后讨论信息与熵的关系以及信息传递在一般系统和复杂系统中的作用。

熵, 德文原名为 Entropie, 是德国物理学家克劳修斯在《热之唯动说》(1864) 中首先引进的, 它取自希腊文 $\etaτροπη$, 由能的词根 en(energeina) 和代表变易的词根 trepein 合成, 表示能量交换, 能量变化的一种状态。在物理学上, 熵是系统的状态函数, 表示系统状态变化的方向, 是系统演化的一个重要判据。

熵的物理表达式是:

$$S = \int \frac{dQ}{T}, \text{ 或 } dS = \frac{dQ}{T}$$

其中 S 表示系统的熵, Q 表示热量, T 表示温度, 按绝对温度进行计量, dQ 表示热量的无穷小增量, 加上一个积分符号表示系统在一定过程中吸收 (或耗散) 的热量 ΔQ , 这个“热温之商” $\frac{\Delta Q}{T}$ (中译者顾名思义, 说它是“火”之商而译成熵) 有何意义? 何以它是系统状态函数、并成为系统演化的一个判据呢? 现在我们假定一个系统由两个靠在一起的物体 M_1, M_2 构成, 其温度分别为 T_1 与 T_2 , 如果 $T_1 > T_2$, 就总有热量 ΔQ 从 M_1 流向 M_2 。

M_1 放热, 状态变化为 $\Delta S_1 = -\frac{\Delta Q}{T_1} < 0$, 熵减少。

M_2 吸热, 状态变化为 $\Delta S_2 = \frac{\Delta Q}{T_2} > 0$, 熵增加。

整个系统状态变化为: $\Delta S_{\text{总}} = -\frac{\Delta Q}{T_1} + \frac{\Delta Q}{T_2}$ 。熵增加。

相反,如果出现第二种过程,热量 ΔQ 能从低温物体 M_2 流向 M_1 , 温度较低的物体的熵就会减少, 即为 $-\frac{\Delta Q}{T_2}$, 而温度较高的物体的熵就会增加 $\frac{\Delta Q}{T_1}$, 此时总熵 $\Delta S_{\text{总}} = \frac{\Delta Q}{T_1} - \frac{\Delta Q}{T_2}$ 。这个值小于零, 是负的。

熵是系统中什么状态的函数呢? 我们在 3.3.1 讨论系统的状态时已经看到, 系统有许多状态变量, 温度这个变量表示物体系统状态是冷是热, 体积这个变量表示物体系统是大是小, 那么熵表示什么状态呢? 它表示物体所处的状态是否稳定、它会朝哪个方向变化的状态。系统会朝那个方向变化呢? 热力学第二定律告诉我们, 热量总是由温度较高的物体流向温度较低的物体, 而不能自发地由低温物体流向高温物体。在孤立系统中, 上述的第二个过程是不会出现的。在实际发生的过程中, 熵的数值总是不断增大的, 所以热力学第二定律又可以叫做熵增定律。

为什么孤立系统中热总是由高温处流向低温处呢? 为什么熵总是增加的呢? 奥地利物理学家玻尔兹曼 (boltzmann) 在《论热力学第二定律与热平衡定律的概率论计算之间的关系》(1877) 一文中给出了统计的解释。他认为在由大量粒子(原子、分子等等)构成的系统中, 熵表示粒子的无规则的排列程度, 系统的紊乱无序的程度, 或者是能量均匀分布的程度。熵越大, 系统的粒子越混乱, 越无序, 自由能越小; 而熵越小, 系统越有序, 能量分布越不均匀, 从而可用以做功的能量就越大。我们可以通过下面的简单例子来说明熵的这种微观的意义:

假定在一个可分为 A, B 两半的匣子中有 N 个可自由运动的粒子, 则 N 个粒子在匣子中有许多可能的分布。假定 $N=3$, 即有 a, b, c 三个分子, 就有以下 8 种可能分布(见表 4.3):

表 4.3

A	B	A	abc	ab	ac	bc	a	b	c	0
		B	0	c	b	a	bc	ac	ab	abc

其中每一种分布的概率为 $1/8$ 。可见 3 个粒子均在左边或均在右边的

概率为 $1/4$, 而相对均匀分布(一边为一个另一边为二个)的概率为 $3/8 + 3/8 = 3/4$ 。可以看出粒子数越多, 它们偏到一边去的概率就越小, 而均匀分布的概率就越大。概率统计学可以证明, 在 N 个粒子中有 N_1 个在左边有 N_2 个 ($N_2 = N - N_1$) 在右边的微观状态数目为:

$$P = \frac{N!}{N_1! N_2!}$$

P 叫做配容数, 其中! 表示阶乘, 即:

$N! = N(N-1)(N-2)\cdots 3 \cdot 2 \cdot 1$ 。而所谓熵用统计进行解释:

$$S = k \ln P$$

k 为玻尔兹曼常数, P 为配容数, $\ln$ 为自然对数即 $\log_e$ 。如果将一封闭系统分为 n 个有不同能级的子区间, 设为能量的微观状态出现时的几率, 则上式可以写成

$$S = k \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

于是玻尔兹曼说:“熵增原理可表示为物体系统总是从不可几状态向可几状态迁移”, “最终将达到最可几状态即热平衡状态。”^①

很明显, 统计解释的熵的表达式与 4.3.3 的信息量表达式非常类似, 且符号与意义正好相反。熵是系统的混乱无序、无组织程度的度量, 熵增意味着混乱程度、无秩序程度和无组织程度的增加; 而信息正好相反, 一个系统所具有、传递和实施的信息量的增加意味着有序程度和有组织程度的增加, 即对走向熵增、混乱和走向衰亡的世界的一种局部抗衡。关于这一点, N. 维纳说得很清楚, 他说:“信息量的概率非常自然地属于统计力学的一个古典概念——熵。正如一个系统中的信息量是它的组织化程度的度量、一个系统的熵就是它的无组织度的度量一样, 这一个正好是那一个的负数。这个观点引导我们产生了许多关于热力学第二定律的考虑, 引导我们去研究所谓麦克斯韦妖的可能性问题, 这些问题也从关于酶和其他催化剂的研究中独立地产生出来, 而关于酶和催化剂的研究主要是为了专门了解有生命物质的新陈代谢和生殖之类的基本现象。生命的第三种基本现象——应激性, 则属于通讯论的范围, 而归入我们刚才讨论过的那一群观念中”。^②

① 转引自朴吕根:《系统学基础》, 四川教育出版社 1994 年版, 第 338 页。

② N. 维纳:《控制论》, 郝季仁译, 科学出版社 1963 年版, 第 11 页。

维纳在另外一本著作中又说道：“消息本身就是一种模式和组织的形式。实际上就像外部世界的各种状态所组成的集合那样，可以认为消息的集合具有熵，正如熵是无组织程度的度量，消息集合所携带的信息解释为负熵，即其概率的负对数”。^①

关于信息怎样起到对抗一个系统熵增的作用，在生命系统中表现得最为突出。遗传信息的保存，一代一代的传递以及这些信息如何控制合成蛋白质，使其发挥生命的功能，正是信息、也就是有序和负熵的一种表现。关于信息与熵的这种联系，在下一节中讨论系统如何利用信息进行控制时会更加清楚。

在这里我们需要特别指出的是，我们讨论的熵，虽然起源于热力学，但经过玻尔兹曼的统计解释，已超出了热力学的范围。例如我们说一滴墨水滴进水里，我们只能看到它向四周围均匀扩散，从来没有看到它会自发地从均匀的稀释的水中冒出一滴墨水来。我们只能看到生命的个体一代一代地死去，从来没有看见腐烂了的尸体和枯骨会组织起来成为一个活的人，这些都是熵增的作用。一个社会如果没有很好的制度和理念加以组织，它就会走向混乱。例如失业增加、犯罪率提高、恐怖活动四起，这就是社会、经济以及生态的熵增。同样，信息的概念本来起源于人与人之间的通讯，但经过申农和维纳提出信息的概念和信息量的数学表达之后，它已从人与人之间的通讯推广到复杂系统之间的通讯，特别是细胞间的通讯、基因的信息保存与传递等等。可见，熵与信息概念已成为一般系统的范畴，成为系统科学的一个研究对象。

►► 4.4 控制与调节

本节将讨论控制的概念、控制在复杂系统中的作用以及控制的基本规律。

^① N. 维纳：《维纳著作选》，钟劭译，上海译文出版社 1978 年版，第 7 页。

▷▷ 4.4.1 什么是控制

什么是控制呢? 综合控制论创始人之一 W. 艾什比以及新控制论代表人物 W. 鲍威斯(W. T. Powers)、马肯(R. Marken)等人的观点, 控制可以定义如下。控制的充分必要条件是:

1. 对系统可能状态 q 进行约束, 即通过选择与还原等相互作用, 减缩到特定状态 q^* , 记作: $C(q) \rightarrow q^*$ 。

2. 对于环境加到 q^* 的干扰与摄动(disturbances & perturbation), 系统总是存在着不断的对抗和补偿行动, 使 q 倾向于返回 q^* , 以至于 q^* 是某种类型的非平衡的稳定态、稳定环或其他类型的吸引子, 记作 $R(q) \rightarrow D(q)$ 。D 为对 q 的干扰效应, R 为对 q 的行动效应。^①

只有同时满足这两个条件的系统与行为才被称为控制, 例如生物中的内稳态(homeostasis), 生物世代的维持生存(survival), 人类的目的性行为, 以及生态系统的稳定性和控制工程的伺服机构(servo-mechanism), 都是控制的例子。不过, 控制可划分为具有独立的控制者系统的“集中控制”和不具有集中控制者的“分布式控制”二类, 本书第4章和第8章主要讨论前者, 第9章研究系统自组织时着重讨论后者。现在我们从前一种观点来讨论控制。

3. 实现控制作用的关键是获取、加工、传递和使用信息的过程。要使控制作用能达到目的, 必须编制并向被控对象输出各种信息, 使其对抗干扰, 改变状态, 达到在变化的环境中保持平衡与稳定, 即系统目标所规定的状态。这个输出信息叫做指令。而为了编制和输出合目的的信息, 控制系统必须收集关于被控系统状态的信息、它所要求的状态的信息(目的信息)、外界环境的信息、环境对系统干扰的信息, 并按一定算法将这些信息加工成指令。由于信息的获得、加工、传递和使用在控制中的重要性, N. 维纳甚至这样说: “工程中的控制理论, 不论是关于人、动物还是机器, 都不过

① W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall LTD. 1957. chapter 10. 11. F. Heylighen(ed). 1st Workbook of the Principia Cybernetica Project. Free University of Brussels Press. p. 27. 张华夏、颜泽贤、范冬萍:《价值系统控制论》,《广东社会科学》2003年第4期,第103页。

是消息理论中的一部分。”^①

▷▷ 4.4.2 控制与调节的基本范式

控制和控制系统的性质和基本范式,在很大程度上取决于用以产生控制指令或指令信号所用的信息来源。为此我们可以将控制和控制系统划分为下列五种形式:

1. 无馈信息控制范式(Informationless paradigm)

这种控制不从被控系统的输入量(包括干扰量)中,也不从它的输出量中获取信息。这时控制者按照它的目标给被控系统预先设计好一个程序,指令被控对象按照这个程序、按照它的要求改变状态,并排除干扰达到目标。其图式如下:

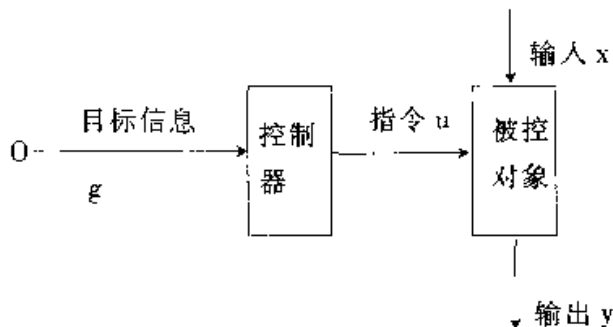


图 4.7 无馈信息控制

例如,按照这个预先设计好的程序导引火箭进入预定轨道,并按指令程序改变火箭运行空间的位置和速度,当它无须考虑火箭飞行所遇到的干扰以及无须设法改正它的轨道偏差时,就是这种控制形式。旧式的火炮,炮弹一经发出,控制者就对炮弹无所作为。指令性的计划经济,按官僚主义的经济计划部门向企业发出生产什么、生产多少以及生产进度的指令,基本上就是这种无馈信息控制方式。当然生物世界也有这种“执行预定程序”的明显例子。一个机体从卵细胞开始的发育、鸟类的季节迁移等,都是遗传细胞的 DNA 的程序预先安排好的。从这种指令 u 无须从这些生物个体的输入输出中获得任何信息来看,可以认为是一种无馈信息的控制。在许多这样的程序中,已经包含了尽可能排除环境干扰的预定设计。如龟的基因引起

^① N. 维纳:《维纳著作选》,钟初译,上海译文出版社 1978 年版,第 3 页。

壳的产生,人的基因引起用大脑头骨来保护大脑细胞免受干扰。人们设计的保温瓶以及计划经济预先设计的高关税壁垒,也都起着这种作用。

无馈信息范式的指令 u , 只与目标有关, 与被控对象的 x 与 y 无关, 因而可以用以下公式表示:

$$u = f(g)$$

2. 前馈控制范式(Feedforward paradigm)

前馈控制范式与无馈信息控制范式不同, 控制者的指令信息 u , 不仅与目标信息, 而且与被控对象的受环境干扰的信息 $D(x)$ 有关。它不断直接接收干扰信息, 根据干扰信息可能对被控对象的影响, 预先做出补偿信号以抵消干扰的作用, 从而保证被控对象的适应性稳定和适应性生存。所以, 前馈控制是一种带补偿作用的控制方式, 其图式如下:

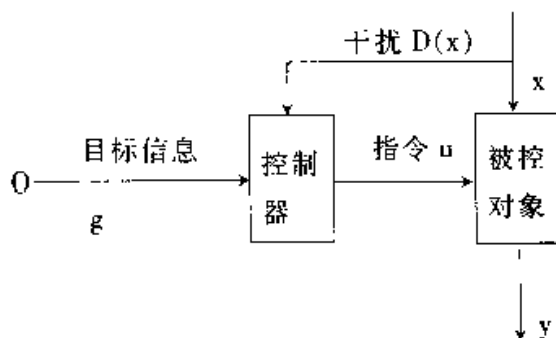


图 4.8 前馈控制范式

这里指令信息 u 与无馈信息控制范式不同, 就在于 u 还是干扰 $D(x)$ 的函数:

$$u = f(g, D(x))$$

只要干扰 $D(x)$ 对被控对象的稳定状态产生偏差 $\Delta y(D)$, 这里 u 就会产生一种预先的控制作用 $\Delta y(u)$, 使得 $\Delta y(D) + \Delta y(u) = 0$, 从而补偿了可能的环境干扰。

事实上, 前面所说的生物学中的无馈信息控制例子只是对于某个单个的生物体来说才是无馈信息的控制, 即不从该生物体的生活境遇中获取信息进行控制。但是对于该物种来说, 其遗传物质正是根据该物种几百万年甚至上亿年的环境干扰中获得的信息而制订的一种前馈控制。这些生物, 有的运用它们的坚硬外壳(如乌龟)来补偿抵消可能出现的天敌的攻击, 有

些运用它们的高速奔跑速度(如野鹿)来逃过猛兽的追捕,有些冬去春来的候鸟(如燕子)就预先做出一种前馈来对抗恶劣气候的干扰,这对于该物种的功能来说是一种前馈的控制。在社会生活中,前馈的控制处处可见,例如计划生育,就是对将要到来的中国人口大爆炸的困境的一种前馈控制。压缩政府的基建,收紧银行贷款,就是对可能即将到来的经济过热、金融危机的一种前馈控制。

前馈控制的优点,就在于它对系统所不希望出现的干扰、变化与破坏提供一种预期与防范的措施。它对于运作精良而且是决定论的系统的作用比较明显。但是,我们生活在一个运作并不精良的、到处充满偶然性和危机的世界里,而这种控制方式却要求能准确预测环境干扰信息,特别是要准确预测环境干扰对被控对象的影响,即 $\Delta y(D)$,因此,就要求有相当高的预测、决策的知识水平与技术手段。对于其他生物来说,就要求它们有相当的认知水平与生活学习的本领。前馈控制由于受种种条件的限制,因而不是控制范式的普通形式。比较普遍的系统控制形式是反馈控制。

3. 反馈控制范式(Feedback paradigm)

反馈的概念在前面几章中都有所讨论,这里主要是从信息反馈的角度来讨论。所谓反馈控制,指的是将被控对象的输出端的信息馈入控制器的输入端作为控制指令的来源对被控对象的一种控制方式。在控制系统中,由于各种环境的干扰以及系统内部的扰动都会对系统状态发生影响,使它偏离系统目标值的要求,因而出现了偏差。这种偏离在被控对象的输出端集中表现出来,因此,将这个输出信息反馈到控制器中与目的信息进行比较,导出偏差信息,作为控制信息抵消干扰的作用,纠正干扰引起的偏离,从而使系统恢复稳定,达到或接近达到它的目标状态,这个过程原理称为反馈控制原理。可用下图表示:

这里 $E(y)$ 是经过测量转换后所获得的 y 的信息,它对于决定指令 u 起关键的作用,其公式为:

$$u = f(g, E(y))$$

反馈又分为正反馈和负反馈两种。正反馈是目标值和输出值的偏差在输入端的馈入反而导致系统输出端的这个偏差更大,而负反馈是目标值与输出值的偏差反过来导致这个偏差缩小。我们这里讲的反馈控制通常指的是负反馈控制。

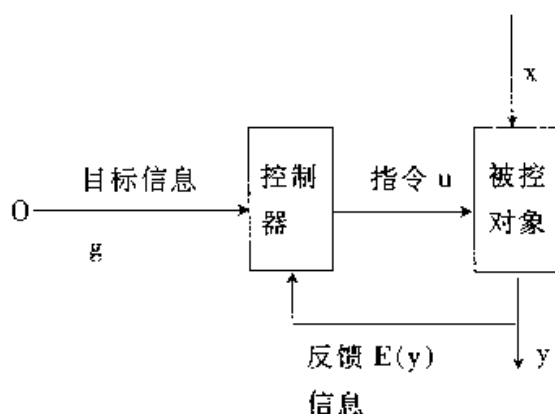


图 4.9 反馈控制范式

我们已经举出许多案例说明负反馈控制怎样促使系统的适应性自稳定。例如在 3.1.3 中我们讲过,在一个生态系统中,由于植被的增长导致食草动物的增长,从而使捕食食草动物的食肉动物增长,这就抑制了食草动物的增长,这个负反馈的作用保证了植被、草食者、肉食者之间的动态平衡。在 3.4.5 中,我们讨论过人体血液中通过负反馈而达到血液中葡萄糖含量的平衡。葡萄糖在血液中含量减少时,引起饥饿感,导致摄食,反过来增加了血液中的葡萄糖,这就是一个负反馈控制原理的例子。在社会生活中,市场经济对企业生产和社会供求平衡的调节是明显的负反馈调节。这里市场价格是最简捷、最有效的信息。当某种产品产量减少时,其供不应求导致价格上涨,刺激了生产该产品的企业与公司扩大生产,从而保证了供应,满足了市场和消费者的需求。当某种产品产量过多时,导致供过于求,引起市场价格的猛跌,这种信息被市场无形地加工出来,迅速地传播出去,那些生产该产品的企业 and 公司知道无利可图,便迅速减少生产,从而导致供销的平衡。根据经济学家萨缪尔森的估计,世界上任何一条重要消息都会在 5 分钟之内对股票发生影响,所以信息负反馈控制的作用在经济生活中是最敏感的。

对于环境干扰相当大、相对复杂、对控制者的影响又不可预测的系统来说,为要达到系统的目的,负反馈控制是具有极大优点而且不可或缺的。

4. 全信息控制范式(Full-information paradigm)

可以将前馈控制和反馈控制组合起来形成一种组合式控制,被称为全信息控制,其图式如下:

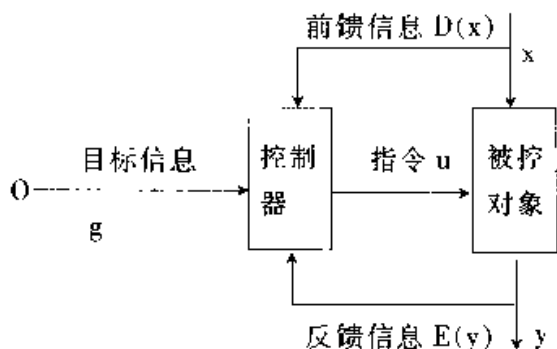


图 4.10 全信息控制范式

这里控制器制定指令的信息来源比较充分与全面。其公式是：

$$u = f(g, D(x), E(y))$$

它既有前馈,可以由某种补偿装置来表示,又有反馈,可以用某种感受器来测量。而控制指令信息 u ,可以由某种效应器转变为对被控对象的物质的或能量的作用,从而改变被控对象及其环境的状态。关于这种控制的详细情况,我们将于第 8 章进行讨论。

5. 多目标多层次控制系统和适应性控制系统

以上讨论的是单层次的控制系統,即对于被控对象,只有一层的目标信息和一层的控制器来加以实现,并且没有讨论目标信息 g 的变化,而暗含着它是一个固定的因子。但是当 g 为一个固定因子时,如果环境发生变化,它的某些变量及其状态超出了原来 u 所考虑和计算的范围,那么,就会发生控制失灵,使被控对象的状态不在 u 的控制之下,这就要求 g 发生变化。如果 g 被理解为一个矢量,并且它的各个分量即各个分状态变量的状态又是可以改变的,它就可能解决控制失灵的问题,这便是多目标体系的问题。例如一个工厂,原来只考虑招工、生产、降低成本、获取利润的问题,于是 g 是一个单纯利润指标,但是当出现诸多工伤事故引致工人罢工,或它对周围环境造成重大污染引致社会干预之后,它的目标体系就会发生变化,增加利润、劳动权益保障以及环境保护就都成了 g 的几个分量,于是出现了多目标体系。

那么,这个多目标体系的目标又是如何决定和调整的呢?这就需要引进一个高层的控制器收集情况,进行决策,给低层控制器发出指令,因此就有了如下的多目标多层次的控制系统(见图 4.11):

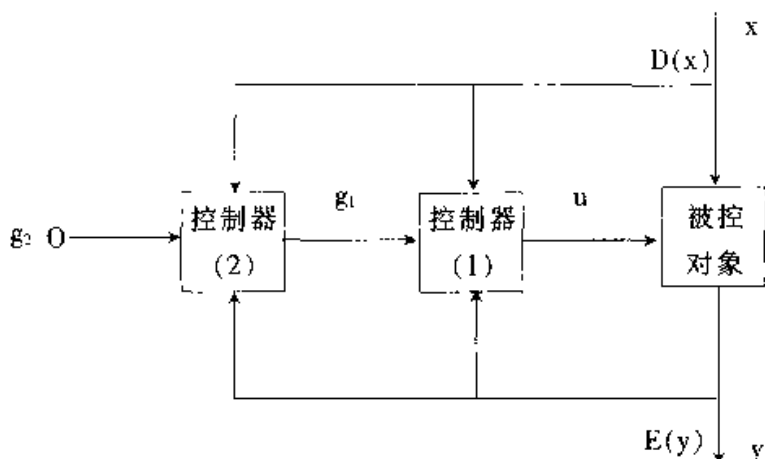


图 4.11 多目标多层次控制范式

关于这个问题,我们将要在第 8 章进行详细讨论。

还应指出,更加成熟的控制系统或目标定向系统是无需外界明确的帮助和干预的。一个系统,如果有能力通过对自己元素重新组织,自行改进它的目标的实现,并在环境发生巨大变化时还有能力改进自己的目标体系,达到更加有序的程度,实现这些新目标,这个系统就被称为自组织系统。这种自组织的机制,不是单纯的控制机制。有关这个问题我们将在下一节和第 9 章中进行讨论。

不过从以上案例分析中,我们可以定性地说明确定通讯与控制的两个基本定律:

定律 1:必要变异度定律(The Law of Requisite Variety)。对被控对象无论进行前馈或反馈的控制,控制的能力受到控制器行动的变异度以及从控制器到被控对象的信道容量的限制。控制器行动的变异度越大,它就越能抵偿需要控制的干扰。^①

定律 2:必要层级定律(The Law of Requisite Hierarchy)。调节与控制器的不确定性越大,它的调节能力越弱,就越需要调节与控制的组织层级,以对它进行一定程度上的补偿。^②

关于定律 2,我们可从 4.2 关于系统的层次结构的论证中推出;关于定

① W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall, 1957, pp. 207-208.

② Arvid Aulin, *Cybernetic Laws of Social Progress*, 1984, p. 115.

律1,在下一节中我们将给出一个较为严格的数学证明。

▷▷ 4.4.3 控制系统的必要变异度定律

我们已经在4.3.3中讨论过变异度(Variety)这个概念,它亦可译为多样性,可用信息熵或信息量来衡量。在4.4.2我们讨论的各种控制范式中,都有三个基本变量:输入被控制对象的控制变量 u ,输入被控对象的干扰变量 x ,以及输出变量 y 。控制系统的目标,是通过 u 的作用缩小 y 的变化范围即它的变异度或熵,使其限制在目标或本质变量所许可的范围内。 u, x, y 是三个变量,它们的变异度或熵都是可以计量的。于是我们有 $H(u, x, y)$,它是以 u, x, y 为分量的矢量的熵, $H_u(y)$ 是已知 u 的状态时 y 的变异度或熵, $H_x(y)$ 是已知 x 与 u 的状态时 y 的熵,等等。

我们首先假定 u 是一个常数,则在条件 u 下的 x 的熵都会转变与表现为 y 的熵,于是有等式

$$H_u(y) = H_x(x) \quad \dots\dots\dots (1)$$

这说明 u 不能完全抵消干扰的熵,于是未被抵消的干扰熵就会导致同样结局的熵。

现在依据统计定律, $H(x, u)$ 可写成两种形式,即:

$$H(x, u) = H(x) + H_x(u) = H(u) + H_u(x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

将(1)代入(2)得:

$$\begin{aligned} H(x) + H_x(u) &= H(u) + H_u(y) = H(u, y) \\ &\leq H(u) + H(y) \end{aligned}$$

于是:

$$H(y) \geq H(x) + H_x(u) - H(u) \quad \dots\dots\dots (3)$$

对于调节与控制来说,作为调控的结果,我们必须将被控系统输出 y 的熵减少到一个特定的最小值,以保持该系统的稳定性,即本质变量处于特定范围,达到预期目标等等。根据公式(3),为了使 $H(y)$ 减少,可以设法:

1. 使 $H_x(u) = 0$,即使 u 为干扰 x 的确定函数。按控制系统定律2,这可能要通过增加控制的层次来加以解决。

2. 尽量使 $H(u)$ 加大。这就是说,在 $H_x(u) = 0$ 的情况下,为要减缩 $H(y)$,至少应使 $H(u)$ 加大到和 $H(y)$ 一样。

这个定律被艾什比形象地表达为:“只有用调控器的变异度(或其状态的多

样性)才能压低干扰所引起的变异度,只有用变异度才能消灭变异度”。^①

可是环境是随机的,是不断变化的,由于熵增定律的不可抗拒的作用,所以干扰从长期的观点看几乎是无限的,而人工设计或自然界“设计”的调控器的变异度或多样性总是有限的,控制系统以及复杂系统的控制能力是有限的。我们不可能控制一切,而只能控制有限的一些事物和变量。每一个活着的人不正是以对自己的生命控制不住而告终吗?这个观点对管理学很有启示,但这个定律并不是要导出悲观的结论。

艾什比说:“我不认为必要变异度定律已经受到足够重视了。……申农是在电话和类似的通讯中讨论这个定理。……生物学家面对的情况是以小量的‘消息’对付干扰很多而且很大……这个定律运用于大脑,说明大脑可能达到的调节与选择的数量有一个绝对的界限……我想,从这里有了一个原理可以展望未来,因为它支配着所有复杂系统的运作。它进入的主题有点像能量守恒定律进入动力工程一样。当这个定律在



艾什比(W. Ashby)(1903—1972)

上一个世纪进入工程学时,许多工程师大失所望,因为它停止了一切永动机的希望。不过它事实上导致了19世纪实践工程的凯歌行进:因为它使工程更加实际,我猜想当这个定律(必要变异度定律)的完全含义被掌握时,我们首先清醒,然后有希望,它使我们集中力量解决实际问题,得到实际答案。”^②英国著名系统管理学家、现任国际系统科学研究会会长杰克逊曾指出,必要变异度定律在管理学中的作用如同爱因斯坦相对论在物理学中的作用一样重要。^③

① W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman Hall LTD, 1957, p. 207.

② W. R. Ashby, "Principles of the self-Organizing", in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*, (2001) Kluwer Academic/plenum Publishers, pp. 617-619.

③ Michael C. Jackson, *Systems Thinking - Creative Holism for Managers*, 2003, John Wiley & Sons Ltd. 中译本见迈克尔·C. 杰克逊著《系统思考》,高飞、李萌译,中国人民大学出版社2005年版,第99页。

4.5 进化与自组织

我们已经讨论了一般系统,特别是复杂系统的存在原理,即系统以突现与层次方式存在,表现出整体性;一般系统特别是复杂系统的运作原理,即系统通过通讯与控制,控制自己及其周围环境。本节要讨论的问题就是一般系统、特别是复杂系统的第三组原理:复杂系统的进化与自组织原理。

4.5.1 广义进化论的兴起

在本章第1节中,我们讨论了系统的突现性质与层次性质,已经接触到复杂系统的进化问题。特别是在第2节中,我们指出,系统是层级地向前进化的,并依据罗斯与西蒙的观点,用自然选择来解释为什么自然界会有不同的层次。可是,什么是系统的适应或自然选择?达尔文的进化论本来是讨论生物物种与适应的关系的,它怎么可能推广到一切系统中呢?我们先来做一个简短的历史回顾。

达尔文的进化论著作《物种起源》是在1859年发表的。他的基本观点是:(1)变异与遗传:一切生物个体都有多样的变异特性,许多变异能够遗传下来。(2)生存斗争:一切生物在环境中为生存而斗争,不同变种对环境有不同的适应能力。(3)选择:在生存斗争中,自然界对所有的变异进行选择,让最适者生存。这种选择作用长期积累形成新物种,这种作用叫自然选择,在人工条件下的选择称为人工选择。例如,由于遗传与变异,一只长颈鹿,它的颈发生突变,长了几公分,就能吃食更多的植物叶子;一只鸟的喙改变之后,可以吃以前啄不到的昆虫,于是它们有了更高的适应能力,在生存竞争中就处于有利的地位。反之,有些性能变差了的物种就在生存竞争中处于不利地位,前者被自然选择了,后者被自然淘汰了,这种作用长期积累形成物种的进化。这里主要讲的是生物物种的适应与进化原理,而不是由不同物种组成的生态系统的适应与进化原理,或有机体内部的器官功能、状态、行为或组分的适应与进化原理,也不是其他系统如原子系统、分子系统、物质系统、社会经济系统、文化系统、智能系统或理论系统的进化。

如果将达尔文的进化论推广到其他系统,可称为广义进化论或广义达尔文主义。

将达尔文的进化论推广到各个领域中并不是一种随意的比喻,而是一种严格的科学工作。有一批著名的哲学家、生物学家、心理学家以及物理学家、包括一大批诺贝尔奖获得者都参加了这个工作。赫胥黎(T. H. Huxley)1869年将进化论推广到分子进化,达尔文自己在1871年在其名著《人类的由来》中将进化论推广到说明语言文法和词汇的进化,美国哲学家詹姆斯1880年在《伟大的思想与环境》一书中将进化论推广来解释学习、思想与文化的进化。在20世纪,皮亚杰(J. Piaget)将进化论用于说明心理的进化,坎贝尔(D. T. Campbell)将进化论用于解释认识过程,卡尔·波普(K. Popper)将进化论用于探讨科学假说和科学理论的进化。乔治·巴萨拉(George Basalla)则将进化论用于理解技术的发展。诺贝尔奖获得者洛伦兹(Konrad Lorenz)将进化论用于解释动物行为。诺贝尔奖获得者西蒙将进化论用于解释复杂系统等级的进化。还有诺贝尔奖获得者艾根将进化论运用于探讨前生命的分子的进化。威尔逊(Edward Osberne Wilson)和道金斯(Richard Dawkins)则将进化论的自然选择运用于说明动物社会。还应一提的是,物理学家和系统科学家哈肯将达尔文的自然选择理论运用于解释激光的形成,而圣菲研究所则将进化论运用于理解计算机和人工智能系统,不仅说明计算机系统的进化,而且为研究复杂系统和生命系统创造了遗传算法。

可见,这些推广工作的一个共识就是:达尔文进化观中的变异与继承、自然选择、适者生存这些规律也是开放的复杂系统的普遍规律和基本原理。本节后面将要讨论广义进化论在几个典型领域的应用,然后分析广义进化论的精确表达和科学内涵。

▷▷ 4.5.2 将进化论用于解释分子的进化

前面讲过近代有赫胥黎,现代有艾根、哈肯、道金斯等人将变异与保存、适者生存、自然选择的进化论原理运用于说明分子的进化,主要是对生命细胞出现以前的生命大分子系统的进化做出解释。我们可以将他们的论点综合如下:

道金斯说:“伟大的生物学家达尔文所说的‘适者生存’其实就是稳定

者生存(survival of the stable)这一宇宙普遍法则的一个特殊情况”。^①因而,将达尔文适者生存见解推广到其他物质系统便是顺理成章的了。整个宇宙为各种稳定的物质系统所占据,这里所说的物质系统,指的是那些原子的聚合体,它是在恒星和行星的演化中形成的。像太阳那样的巨大系统,在恒星表面的高温条件中,就只有氢、氦这些简单原子系统能够保持稳定,从而生存下来。其他的较为复杂的原子系统,以及任何原子化合物即分子系统,都因其不能稳定而不适于生存。到了行星发展的一定阶段,特别是由于地球表面的冷却,各种原子、分子的系统就可能存在了。问题是生命前期的分子、构成生命基础的分子是怎样像赫胥黎所说的那样,“组成生命机体的分子有多样性的倾向,彼此竞争以得到机会存在与繁殖,最后其胜利者产生作为整体的生命有机体”^②呢?

20世纪50年代奥巴林、米勒等人模拟原始地球的雷鸣闪电,从原始大气的简单化合物 CH_4 , NH_3 , H_2O , H_2 等小分子材料中,人工合成了蛋白体的基本单元,即各种氨基酸。70年代,科学家们在实验室中又模拟生命起源前地球的化学条件,合成了基因物质DNA的组成单元,即嘌呤、嘧啶、核苷酸等。这些被合成的物质,即有机大分子,就是30亿到40亿年前地球原始海洋布满着的“原始营养汤”的组成部分。这些数量巨大的原始有机大分子,在太阳紫外线等能量作用之下,经过若干亿年的随机结合,偶然合成了能够复制自己的复制者(replicator),它就是某种有机大分子的长链,它在原始营养汤中由小分子构成,具有吸引其他同类分子的亲和力,于是就复制出与它自己在序列上一模一样的另一条有机分子链。这种分子链也可能与另一类分子有吸引亲和力,于是复制出自己的“负像”拷贝,这些“负像”拷贝反过来再产生“正像”的、即与自己一样的有机分子链。在这里,大分子复制相当于达尔文进化论的遗传,而复制拷贝错误(这是任何形式的复制都不可避免的)相当于达尔文的变异。这就是我们在4.5.1讲到的达尔文进化论基本观点的第一点。

随着复制错误的产生和扩散,原始营养汤中出现各种不同序列的有机

① 理查德·道金斯:《自私的基因》,吉林人民出版社1998年版,第12页。

② Henry Plotkin, *Darwin Machines and the Nature of Knowledge*. Harvard University Press, 1994, p. 61.

分子链。有一些分子链比较稳定,不像其他分子那样易于分裂,它就具有更高的适应能力。这种适应能力由三个要素组成:(1)长寿,不易分解。(2)自我复制速度快,即繁殖能力强。(3)复制准确性高,即不易变为别的复制者。如果我们将取决于这三要素的复制者 x_i 适应能力定义为它的适应度,即 $F(x_i)$,那么,我们就可以给出一个形式的定义和计算公式。复制者系统或其型构(configuration) x_i 的适应度

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^n p(x_j \rightarrow x_i) \Delta t_i - \sum_{j=1}^n p(x_i \rightarrow x_j) \Delta t_i \quad (\text{其中 } i, j \in \{1, 2, \dots, n\})$$

这里 $p(x_j \rightarrow x_i)$ 为 x_j 转变为 x_i 的概率,表示自我复制的速度, $p(x_i \rightarrow x_j)$ 为 x_i 转变为 x_j 的概率,即复制的不准确的概率。这个概率越小, $F(x_i)$ 越大。 Δt_i 表示 x_i 的平均寿命。这样 $F(x)$ 就成为各种不同复制者的适应度的量度。这个公式只要做出某种带普遍性的诠释,就可以成为一般复杂系统的适应性的定义与度量。不过我们还是从生命大分子的自然选择方面来看这个问题。我们可以很容易想像原始营养汤中用以复制自己的资源是有限的。那么,不同品种的有机分子链即不同品种的复制者之间就存在生存竞争或生存斗争。那些适应能力强的复制者被自然选择,而那些适应能力弱的就被淘汰了。这就是 4.5.1 讲的达尔文进化论的第二个基本点和第三个基本点。

可见,有了这三个基本点,将达尔文的进化论运用于分子的进化可以说是合理的。当然,将达尔文进化论运用于分子进化的比较精确的例子,是艾根的“超循环理论”,介绍这个理论超出了本书的范围。而将进化论运用于激光的形成与进化的例子,是哈肯在协同学中得出的。在这里,我们将哈肯的结论摘录如下,使读者能了解它的意义。

“按照达尔文的观点,这些物种新形态的产生一方面是由于偶然的突变,另一方面是由于选择。各种动物,或多或少地善于适应它们的环境,为食物而竞争。也可能有其他形式的竞争,例如鸟类在寻找筑巢地和免受危害的处所时,各种不同物种之间的竞争开始了,而只有适者生存了下来。这些就是达尔文主义的基本论点。”

“然而,这里我们遇到一系列的困难,认识到这些困难的主要是生物学家和自然哲学家。‘适者生存’规律可以比做一只猫咬它自己的尾巴而团

困转。谁能生存,谁就是适者(这是一个循环论证)。因为达尔文主义不仅存在于有生命自然界,而且在无生命物质中也存在着。我们已把激光作为一例,其中我们发现各种激光光波之间存在着竞争,最终也只有一种波生存下来。我们当然可以称它为‘适者’。然而重要之点在于,在激光物理学中我们可以事先计算出哪种波将生存下来,也就是说哪种波是适者。这里有着客观的标准,从而我们在整个过程前,已可以预言谁将取胜。但这里还有一个保留条件:偶然有几种波会同时成为适者的候选人。”“在激光波中,在生物分子中,在超循环中,并在动物和植物界中,达尔文主义都起作用。达尔文规律支配着有生命和无生命物质,这一事实显示出它的重大意义。它对必然研究诸如职业和经济竞争的社会科学也有直接的意义。在这个意义上应用达尔文规律,就形成了产品相同但售价各异的各公司。这些公司受市场选择作用的影响,最后只剩下一个公司来垄断市场。”^①

▷▷ 4.5.3 将进化论用于解释科学理论的发展

著名英国科学哲学家卡尔·波普从20世纪30年代到50年代建立了证伪主义知识进化论,提出了他的知识进化的基本公式。70年代,他在《客观知识》(1972)和《进化认识论》(1973)著作中运用达尔文的进化论重新解释了他的知识进化论,成为广义达尔文主义的一个重要支持者和研究者。

他认为,科学理论的发展和进化,是通过猜测与反驳而进行的,而这也正是科学知识区别于其他理解世界的方式的划界标准。他认为,像生物进化起源于生存问题一样,科学理论起源于科学问题(P_1),而为了要解决问题,科学家们提出多样性的可证伪的试探性的假说或理论。这些假说的提出不是归纳的结果,而是创造性的猜测($TS_1, TS_2 \dots$)。这些试探性猜测将受到严格的批判和实验与观察的检验,力图将它们驳倒,以排除错误(E E)。于是有些假说很快就被淘汰,而另一些假说则可能被证明是比较成功的。当已经成功地经受了广泛而严格检验的假说最后被证伪时,一个与原先解决了的问题全然不同的新问题又被提出来,如此循环,科学理论便得到发展。波普的知识增长公式是:

① 赫尔曼·哈肯:《协同学:大自然构成的奥秘》,斯图加特1986年第4版,上海译文出版社1995年版,第73—75页。

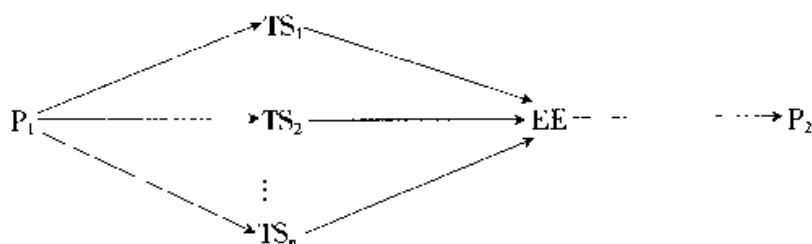


图 4.12 波普知识进化图式

上式中, P 代表问题 (problem), TS 表示试探性解决 (tentative solve); E 表示排除错误 (error elimination)。

例如, 蝙蝠为什么夜间能够飞行并绕过各种障碍物? 这是一个科学问题 (P_1), 我们为解决这个问题可提出多样性试探解决, 如提出它如猫头鹰一样, 有敏锐视线 (TS_1), 它如盲人一样用耳朵导航 (TS_2), 或它如狗一样用鼻子导航 (TS_3), 它用嘴巴发出尖叫声 (超声波) 利用回声绕过障碍物 (TS_4) 等等。为解决这些问题, 科学做出许多精确实验 (如蒙眼睛、塞鼻孔、塞耳朵、堵嘴巴等), 结果 TS_1, TS_2, TS_3 都被淘汰了, 于是留下了超声波说 (TS_4)。

波普认为, 这是一个达尔文的多样性变异和适应性进化的自然选择问题。上述图式在什么意义上说是个进化论问题呢? 我们可对照达尔文进化论的基本点来进行分析:

1. 关于问题, 波普说: “所有的有机体昼夜不断地从事于解决问题”。^① 这些问题就是生存问题, 也可以扩展到科学问题。科学问题虽然是求真问题, 但归根到底也是人类的生存与发展问题。当然直接地是关于一种理论或假说能否存在的问题, 这部分地符合了达尔文进化论的生存竞争。

2. 关于尝试的多样性或变异问题。生物基因有突变, 有机体有个体性状的变异。各种解决科学问题的理论与方案也是一种多样性变异。波普说: “新的反应、新的形式、新的器官、新的行为方式、新的假说都是试探性地提出来的, 受排错法控制。”^② 这符合达尔文进化论的变异原理。

3. 关于排错、淘汰或选择。按照达尔文进化论, “淘汰”通过包括排除与消灭不成功的物种或“抑制不成功的器官、形式、行为或假说等

① 波普:《客观知识》, 舒炜光等译, 上海译文出版社 1987 年版, 第 254 页。

② 同上。

来进行。”^①而科学理论或科学假说的被淘汰,不是要淘汰和消灭提出这种理论和假说的人,而是淘汰那些不成功的假说和理论本身,保留那些经得起考验的有生命力的科学理论。这当然可以看做一种广义的“自然选择”。

将达尔文的进化论与科学知识进化论进行类比时,有一个问题就是科学知识和科学理论是没有遗传的,但它和一切社会文化一样有一种持续性的或代际相传的机制,这就是通过模仿与社会传统的代代相传。科学哲学家 T. S. 库恩将一种重大的科学理论及其解决问题的典范,看做是一种“范式”,它有着稳定的持续性,用以教育一代一代的范式支持者保持它的传统,按这种传统进行常规研究,这就是一种“文化基因”。文化基因这个概念是由亨德森(Hazel Henderson)所创造,用以解决文化进化中的复制机制问题。道金斯(Richard Dawkins)则创造了一个词叫做 Meme(由英文的模仿 mimetic 与记忆 memory 组成)来说明文化基因,它表示由一些头脑或信息贮存系统(如书本)复制到另一些头脑或贮存系统中去的信息单元,是文化进化中的自我传播单元。思想、语言、时装、流行歌曲、科技发明、道德和美学价值等等,都可以成为 Meme 而相互传播或代代相传。

有了上述一些意义的推广,进化论便可以推广解释科学理论的进化了。所以波普说:“我们的知识增长是一个十分类似于达尔文叫做‘自然选择’过程的结果,即自然选择假说:我们的知识时刻由那些假说组成,这些假说迄今在他们的生存斗争中幸存下来,由此显示它们的(比较的)适应性;竞争性的斗争淘汰那些不适应的假说……这种境况的陈述意味着它描述了知识实际上是怎样增长的。当然它不是在隐喻上说的,尽管它也用了隐喻。我要提出的这个知识理论大体上是关于知识增长的达尔文理论。从阿米巴到爱因斯坦,知识的增长过程总是相同的:我们试探着解决我们的问题,并通过淘汰过程,获得在我们的试探性解答中某些接近适应的东西。”^②

▷▷ 4.5.4 广义进化基本原理

将达尔文的物种进化论推广到一般系统进化论甚至复杂系统进化论,需要有一个普遍性的概括。而最有代表性的表述是美国心理学家和进化认

① 波普:《客观知识》,舒炜光等译,上海译文出版社1987年版,第254页。

② 同上,第273--274页

识论创始人唐纳德·坎贝尔(Donald T. Campbell)提出的:所谓广义的进化论原理就是盲目的变异与选择的保存原理(The Principle of blind - variation - and - selection - retention)。他说“盲目的变异与选择的保存对于所有的归纳成就,对于所有的真正知识增长以及对于所有的系统环境的适应,都是基本的。”^①这个基本原理有如下含义。

1. 系统的盲目多样性变异原理

系统在进化的过程中,它的构型(configuration)会产生多样性的变异。这里所说的构型,包括系统的个体与种类、属性与状态、行为与形态、结构与功能诸方面。只要时间足够地长,它们都会发生各种各样的变异。除了前面所列举的基因突变与漂移、科学理论和科学假说的多样性尝试外,我们还要举出两个典型的例子来说明这个原理。第一个例子是人体的免疫系统。我们知道,所有的生命有机体都有办法对付外来的人侵物质。在人体中,有淋巴系统,其复杂性不亚于神经系统,它有比神经细胞多十倍的淋巴细胞在其相关脉管中运行。淋巴细胞是专门用来对付外界侵入人体的细菌、病毒以及任何异己的东西(统称为抗原)的。它们有些是噬菌细胞,吞噬与破坏入侵细菌以及被损坏的细胞,有些则产生某种化学酶和某种物质,将这些异己的蛋白质或其他物体加以分解。这就是说,淋巴细胞的作用是产生抗体来消灭抗原。淋巴细胞及其产生的抗体非常专一。一种疾病有一种专一的淋巴细胞加以对付,一把钥匙开一把锁。有一个时期(20世纪50年代)分子生物学家认为淋巴细胞的抗体是这样产生的,它是一种可塑性的大分子,当抗原入侵之时,它叠加在抗原的“模板”之上而产生出来,就如同一个人的手套和手相匹配一样,也就是说它在外界环境直接作用下产生。直到最近才彻底弄清,原来淋巴细胞本身有极大的多样性和变异性。当外界抗体入侵时,淋巴细胞的变异多样性使得它有足够的变体应对外来入侵者。当外界入侵者进入时,免疫系统的作用就是将变体选择出来,加以克隆复制,以便专一地对付特定的病菌。只要你想一想人类有多少种传染病,有多少种侵入人体的病菌,以及这些病菌又会发生怎样的变异,就会明白淋巴细胞及其抗体的多样变异性。在4.4.3中我们提到必要变异度定律,如果人体

^① D. T. Campbell, "Evolutionary Epistemology". In P. A. Schilpp. (ed.) *The Philosophy of Karl Popper*, The Library of Living Philosophers, 1974, p. 421.

免疫系统不具有足够的变异度或多样性,就不能对付各种各样的外来细菌和病毒的入侵。

另一个例子是距今 5.5 亿年的寒武纪,经过 30 亿年单细胞的发展史,到了这时出现多细胞。多细胞一出现,一下子来了多样性变异的大爆炸,各种各样的变异体纷纷出笼,千奇百怪,为后来生命的选择与进化打下了基础。生物学家考夫曼为此写道:“那时,好似地狱之门豁然打开,妖魔鬼怪纷纷出笼,进化的创意突然进展,如今所有门类的生物,天上飞的、水上浮的、地上走的、地底爬的,挨挨挤挤于每一个犄角、每道缝隙,天涯海角无处不在,甚至数百米之下的岩石里都有的生命,似乎一下子创生出来”。^① 还有一个例子就是人类工业产品的多样性。到目前对之还没有精确的统计,光是 1790 年以来美国就发布了 470 万种专利。差不多 150 年以前,马克思在伯明翰就发现光是锤子就有 500 多种。当今包括电脑及其元件在内的电子设备的形态及其功能的多样性和变化的迅猛,是我们每个人都无法想像的。计算机领域有一个人所共知的“摩尔定律”:微芯片上集成的晶体管数目每 12 个月翻一番,由此导致的结构功能及其复杂性的变异也成比例地增长。正像达尔文发现了生物物种的变异,但其原因还未搞清楚一样,技术上的人工客体的多样性变异的原因尚无定论。一般认为,知识与劳动的分工不同,人们之间的偏好差异,人类及其科技人员的想像力的丰富,知识积累,环境迁移,技术客体之间的杂交等等,都是造成这种多样性变异的原因。

值得指出的是,作为系统进化的一个机制的多样性变异通常是自发的,盲目的,不是直接针对外界环境的要求而发生,而是在“不知道”变异者是否被选择的情况下发生的。基因的突变是一种随机的偶然性,长颈鹿的鹿颈可能变短,也可能变长,生物个体和物种有可能变得更适应于环境或更不适应于环境,这些是自发产生的。当然人工产品的变异,并非完全是盲目的。人们是为了社会的需要而去发明创造的,不过一个新产品在它发明创造之时,谁也不能准确预料,它是否真的能成功地被社会所选择和接受,从而提高人类的适应性生存和发展的能力,这里充满着风险与疑难,随时有被淘汰的危险。例如电动小汽车、蒸汽小汽车、私人小飞机、核动力飞机等,试

^① 斯图亚特·考夫曼:《宇宙为家》,李绍明、徐彬译,湖南科技出版社 2003 年版,第 15 页。

制或开发时热火朝天,设计者和生产者都没料到出产不久就被淘汰。所以导致进化的多样变异体,当其产生之时与环境无直接适应关系,不能准确预期其将来是否被选择,在这个意义上是盲目的变异。它是一般系统、特别是复杂系统进化的基础。

2. 系统的选择保存原理

由于系统构型的不同,变异体各有不同的对环境的适应性。这里所谓适应性,就是4.5.2中所说的生存的概率。显然,生存下来的概率有所不同,这是相对于特定的外界环境或特定的选择标准而言的。对竞争着以吃森林中的树叶为生的长颈鹿来说,在其他条件不变的情况下,颈长者的生存概率比颈短者生存概率大。适应性问题是一个有关系统变异体与环境的关系问题,这个关系决定它们的适应度即生存概率。如果系统的不同变异体的生存概率都相等,就不会存在着选择。

所谓选择就是系统变异体的多样性在环境的压力下的减缩过程。这个过程中,一些不适应环境的系统变异、可能性与替代方案被排除,而适应环境者得以生存下来,这就是所谓“适者生存”原理。这里环境的概念依不同的系统有所不同,对于自然界的生物物种来说,环境指的是自然环境,选择指的是自然选择。而对于人工产品的选择来说,环境除了指自然环境外,还包括社会经济环境、社会政治环境和社会文化环境。其中第一个约束条件就是看它在经济上是否有利可图,是否满足人们的经济需要。例如蒸汽机的使用与改进,内燃机的使用与改进,铁路运输的兴起和没落,民航事业的崛起过程,它们对于环境的适应与否起着持久的作用。然而军事的因素,作为社会政治环境的作用,有时又是决定性的。如果不是第二次世界大战美国要抢在德国之前开发原子弹,在和平时期大概没有一家公司或政府会为了商业用途拿出几十亿美元来开发完全没有太大把握的原子弹并用它的材料进行核发电。至于社会文化环境,也是人工产品能否被选择的一个因素。公元8世纪到11世纪,我国先后出现了雕版印刷术和活字印刷术,后者在经济上明显地更有效率,但它之所以直到19世纪还没有被推广,是因为它不能像雕版印刷那样保持人们所欣赏的那种完美书写的艺术形式。

系统进化还必须有一个保存和传播的机制,使适应环境的被选择的变异体能保存下来、传播出去。在生物物种中,变异保存是通过遗传来实现

的,而在社会系统中,正如我们在4.5.2中指出的,它是通过“文化基因”来实现的。人类的语言、书本、学习过程、文化传统、科学规范等等对于社会系统来说,起到如同遗传对于生物系统的那种作用,使变异在代际间进行保持和传播。

▷▷ 4.5.5 进化与自组织

我们扩展了达尔文的随机变异与自然选择理论,将它扩展到从生命的分子起源到社会文化系统和生态系统的发展,即将它看做是复杂适应系统产生与进化的一个规律。然而,复杂系统有着极为复杂的有序性。每一个细菌协调着几千种蛋白质和其他分子的合成与分配,人的身体的每一个细胞协调了10万个基因及其制造出来的酶和蛋白质的活动。而地球上几十亿人口的各种生活的协调,各种制度的建构都是井井有条地进行着。这些高度的有序性,当然需要用选择来进行解释,也就是说它是必要的,但单靠随机的变异和自然的选择能够对此进行充分的解释吗?况且,自然选择有一个前提,也就是系统的多样性构型已经形成。选择并不是创造各种不同的系统,而是对已经形成的系统进行选择。那么作为自然选择基本单元的基本系统及其型构或初始系统及其性状是怎样形成的呢?它们只是完全随机组合的结果吗?



考夫曼(Stuart Kauffman 1939—)

有一些学者,例如法国生物学家、诺贝尔奖金获得者雅克·莫诺(J. Monod)认为,生命的产生是高度不可能的偶然事件,是一些大分子“撞大运”偶然碰在一起的结果。“如果语言是另一桩独一无二的事件”,“如果语言是像已出现的生命本身那样独一无二的事件,那么,在出现语言以前还曾出现过语言的偶然性,真是微乎其微的……我们人类是在蒙特卡洛赌窟里中签得彩的一个号码。当人们看到一个人刚从赌场里赢了钱而摇身一变成百万富翁时,我们感到惊讶,同时又觉得好像梦幻般的不真实,产生这种感觉是很自然的,没有

什么可奇怪的。”^①

斯图亚特·考夫曼曾仔细计算过那些无生命的大分子以恰到好处相互凑合在一起成为一个活的最简单的生命体的概率。首先氨基酸有20种,要随时排列碰出一个含200个氨基酸的实际细菌酶的概率为 20^{-200} 。为了计算方便,就算它是 10^{-200} 吧。可是要复制一个最简单的细菌,选出一个酶还不够,必须聚集2000种起作用的酶,于是通过偶然组合,组合出细菌的概率为 $10^{-200 \times 2000} = 10^{-400000}$ 。可是地球的历史只有45亿年,就算有40亿年时间供生命创造,尝试创造生命的次数按罗伯特·夏皮罗《起源》一书中计算也只有 2.5×10^{51} 。以这么少的尝试次数而成功概率又是 10^{400000} 分之一,这少,比在赌场上成百万富翁的可能性小了很多很多,它的可能性按考夫曼说“就可以跟一阵龙卷风刮过垃圾站,用其中破铜烂铁装配起一架波音747相提并论”^②。考夫曼等人认为,为了解释生命的起源,必须有一个自组织机制来补充多样性的变异和选择保全机制,这个机制就生命起源来说,是无生命大分子聚集到一定程度,它的多样性达到一定程度,这个团聚体就必然地成为自我催化系统,这种自我催化系统能够自我维持和自我繁衍,它就是生命。有关这种自组织形式,我们将在第9章进行讨论。不过将自组织和自然选择看做是系统进化的两驾马车是很有道理的。考夫曼说:“我们必须把自组织和达尔文式选择两者的作用都包括到进化论之内”。^③“现在我们已经可以将进化理解为选择与自组织的联姻”。^④

什么是自组织呢?所谓自组织就是系统通过自身的力量自发地增加它的活动的组织性和结构的有序度的进化过程,它是在不需要外界环境和其他外界系统的干预或控制下进行的。它是在远离平衡态和输入负熵的条件下,通过涨落或噪声以及系统元素之间的表现为自催化,交叉催化和超循环等形式的非线性协调相互作用,使系统发生分叉和突变,从而重新组织自己的实体、过程和力,形成新的有序结构的过程。在第9章中读者会明白有关

① 雅克·莫诺:《偶然性和必然性》,上海外国自然科学哲学著作编译组译,上海人民出版社1977年版,第101、108页。

② 斯图亚特·考夫曼:《宇宙为家》,李绍明、徐彬译,湖南科技出版社2003年版,第57页。

③ 同上,第32页。

④ Stuart Kauffman, *Antichaos and Adaptation*. [http://www. Protolista. org/E-Zine/origin-soforder/Nature-equilibrium. htm](http://www.Protolista.org/E-Zine/origin-soforder/Nature-equilibrium.htm) pp. 5-7.

术语的内涵的机理,本节谈论自组织旨在指明:以层次突现为标志的复杂系统的整体性和系统性是由三个主要系统机制引起的,即控制机制、自组织机制和自然选择机制。这些机制之间是相互联系的,它们和突现与层次一起,构成为系统科学的基本思想和基本原理。本书以后各章正是对于这些基本思想的进一步发挥。

第 5 章

系统方法

本章所要讨论的问题有两个方面:第一,作为新兴学科群的系统科学使用一些什么方法来研究系统的复杂性和整体性?系统科学并不是游离于传统科学之外的学科,因此,传统的科学方法,关于观察、实验、假说、经验、确证、解释、预言、理论化(还原与整合)、科学规范等科学研究方法,在科学哲学中得到了系统的论述,对系统科学同样是适用的。本章不再对这些方法进行论述,只探讨某些对于系统科学研究来说有特点、有特色的方法。第二,系统科学对传统科学以及其他人类生活领域能够提供一些什么样的科学方法论的启示?对于这一方面,本章只选择系统科学的典型科学理论和科学方法中会对其他科学的研究与探索具有启发意义的内容加以介绍和讨论。有关这个问题的大部分工作,还须在第11、12两章讲述系统管理时加以论述。有鉴于这两个方面,本章将讨论下列问题:(1)系统科学与跨学科研究方法;(2)还原与上索、层次分析与综合方法;(3)功能分析与黑箱方法;(4)隐喻、类比与模型方法。

►► 5.1 系统科学与跨学科研究方法

传统科学的主要研究方法是分门别类的专业分工研究方法,而系统科学的首要研究方法是跨学科的研究方法。

▷▷ 5.1.1 跨学科研究的兴起

近现代自然科学是从古代自然哲学中分化发展起来的。古代自然哲学着重从整体上把握自然,常常是在没有弄清整体由那些部分组成之前、在没

有细致地考察事物的具体细节之前就对整体进行猜测与思辨,并把这些猜测与思辨当做是一种最后的认识,在这个基础上对各种问题发表意见。后来证明,许多这样的意见是轻率的、错误的、经不起推敲的。通过反思,人们发现了两点:第一,原来的研究方法出了问题,自然的规律不是凭猜测和权威言论便可以发现的,只有通过严格的观察、实验和归纳检验的方法才能发现自然规律和社会规律。第二,原来人们过高地估计了自己的认识能力,好像单凭自己的猜测和思辨就能对世界上的事情无所不知、无所不能似的。16世纪伽利略、培根等人发动了科学革命,根本改变了旧的思维方式和理智狂妄,倡导实验、归纳的科学方法论,认为如果人们对问题没有经过观察、实验和检验,就最好不要肯定自己的猜测。这时人们认识到自己的认识能力是有限的。一个人在研究工作中只能往一个领域深钻下来,他钻研得愈深,就愈不能顾及其他领域。因此,分析和分门别类的研究是必要的,专业分工是不可避免的,舍此不能深入了解自然,不但不能深入了解自然界的部分,而且也不能了解由这些部分所组成的全体。关于这一点,恩格斯有过一段评价。他说:“精确的自然研究只是在亚历山大里亚时期的希腊人那里才开始,而后来在中世纪由阿拉伯人继续发展下去;可是,真正的自然科学只是从15世纪下半叶才开始,从这时起它就获得了日益迅速的进展。把自然界分解为各个部分,把各种自然过程和自然对象分成一定的门类,对有机体的内部按其多种多样的解剖形态进行研究,这是最近400年来在认识自然界方面获得巨大进展的基本条件。但是,这种做法也给我们留下了一种习惯:把自然界中的各种事物和各种过程孤立起来,撇开宏大的总的联系去进行考察……就造成了最近几个世纪所特有的局限性,即形而上学的思维方式。”^①

恩格斯这段话精辟地揭示了近代自然科学的特点。当然,这里我们需要指出的是,科学发展的“最近四百年来的历史,没有任何反对分门别类的研究和专业分工的理由。这种分门别类的研究任何时候都是需要的,这种研究方法是悖论性的。一方面,它愈分愈细,愈钻愈深,就愈不能也愈不想顾及其他科学领域,但另一方面,愈分愈细,愈钻愈深,在某种情况下,发展到一定的程度,就愈想运用它的研究成果去解释其他领域,运用它的研究

^① 恩格斯:《反杜林论》,人民出版社1999年12月第3版,第19—20页。

去进入学科之间的边界处,那是无人进入的边缘区。自然界和科学本来就是统一的,因此,科学分门别类研究的进一步发展,就是20世纪初出现的这种跨学科研究的趋势。量子物理学研究愈深入,量子力学的成果愈多,就愈想利用这个成果来解释化学键的本质,量子力学的基本方程薛定谔方程的发现者就愈有冲动去研究“生命是什么”。^① 读者如细心地去阅读薛定谔在这本书的序言中的一段话,就会理解跨学科研究的要领。薛定谔说:“人们普遍认为,科学家总是对某一学科具有广博深邃的第一手知识,因而他不会就并不精通的论题去著书立说。……可是,我们从先辈那里继承了对于统一的、无所不包的知识的强烈渴望。最高学府(大学,大学一词在英文中和普遍性同字根)这个名称使我想起了从古到今多少世纪以来,只有普遍性才是惟一可打满分的。可是近100多年来,知识的各种分支在广度和深度上的扩展使我们陷入了一种奇异的两难境地。我们清楚地感到,一方面,我们现在还只是刚刚开始获得某些可靠的资料,试图把所有已知的知识综合成一个统一的整体;可是,另一方面,一个人想要驾驭比一个狭小的专门领域再多一点的知识,也已经是几乎不可能的了,除非我们中有些人敢于去着手总结那些事实和理论,即使其中有的是属于第二手的和不完备的知识,而且还敢于去冒把自己看成蠢人的风险,除此之外,我看不到再有摆脱这种两难境地的其他办法了”。^②

▷▷ 5.1.2 系统科学与跨学科研究

系统科学是跨学科研究的结果,而跨学科研究正是系统科学的基本研究方法之一。

系统科学的目的是要研究一般系统、特别是复杂系统的基本规律,因此,它要探讨的问题绝非某一个或某几个传统的学科门类所能解决的问题。我们在第2章中所谈到的几次系统运动的浪潮,本质上就是跨学科研究运动的浪潮。

首先,在以一般系统论的建立为标志的第一次系统运动浪潮中,控制论就是典型的跨学科研究的结果。根据控制论创始人维纳的记载,从20世纪

① 埃尔温·薛定谔:《生命是什么》,罗米欧、罗辽复译,湖南科技出版社2003年版。

② 同上,第1页。

30年代到1944年为止,美国哈佛医学院成立的一个跨学科研究会——科学方法讨论会,参加这个研究会的有数学家、物理学家、电子工程学家、神经生理学家、逻辑学家和分析哲学家,正是他们的共同研究产生了控制论这门学科。

数学家维纳说:“许多年来,罗森勃吕特(医学)博士和我共同相信,在科学发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。从莱布尼兹以后,似乎再没有一个人能够充分地掌握当代的全部知识活动了。从那时候起,科学日益成为专门家在愈来愈狭窄领域内进行着的事业。……今天,没有几个学者能够不加任何限制而自称为数学家,或者物理学家,或者生物学家。一个人可以是一个拓扑学家,或者一个声学家,或者一个甲虫学家。他满嘴是他那个领域的行话,知道那个领域的全部文献,那个领域的全部分支,但是,他往往会把邻近的科学问题看做与己无关的事情,而且认为如果自己对这种问题发生任何兴趣,那是不能容许的侵犯人家地盘的行为。”

“这些专门化的领域在不断增长,并且侵入新的疆土。结果就像美国移民者、英国人、墨西哥人和俄罗斯人同时侵入俄勒岗州所造成的情形一样——大家都来探险、命名和立法,弄得乱七八糟、纠缠不清。有这样一些科学工作的领域,人们从纯粹数学、统计学、电工学和神经生理学等等不同方面来探索它;在这样的领域里,每一个简单的概念从各方面得到不同的名称;在这样的领域里,一些重要的工作被各方面重复地做了三四遍;可是却有另一些重要工作,它们在一个领域里由于得不到结果而拖延下来,但在邻近的领域里却早已成为古典的工作。”解决这些问题的方法论要求是什么?用我们通俗的话来说就是一专多能,跨学科共同讨论,使用统一术语表达,当涉及系统科学问题时就表述为系统科学的概念和定律。所以维纳继续说:“到科学地图上的这些空白地区去做适当的查勘工作,只能由这样一群科学家来担任,他们每人都是自己领域中的专家,但是每人对他的邻近的领域都有十分正确和熟练的知识;大家都习惯于共同工作,互相熟悉对方思想习惯,并且能在同事们还没有以完整的形式表达出自己的新想法的时候就理解这种新想法的意义。数学家不需要有领导一个生物学实验的本领,但却需要有了解一个生理学实验、批判一个实验和建议别人去进行一个实验的本领。生理学家不需要有证明某一个数学定理的本领,但是必

须能够了解数学定理中的生理学意义,能够告诉数学家他应当去寻找什么东西。”^①

这个跨学科研究最典型的案例是“反馈”概念的建立。如前所述,反馈就是通过将输出值和目标值之间差异的测量回输到输入端来控制系统使其达到目标的控制动作。这个反馈概念,在航海中叫做“掌舵”,当一艘航船驶向海港时,灯塔指明码头的目标,舵手靠的是将实际航向与目标之间的偏差信息输给舵盘,来纠正航向以达到目的地。但这个概念对电子控制工程师来说叫做“反馈”,例如要改善一个电子管放大器输出电波的抗干扰性能,就从输出端连接一个电阻再回输到放大管电路的输入端。可是在神经系统中,它叫做一种随意活动。^②例如你要去捡起一枝铅笔,本质上就是通过视觉和身体感觉将铅笔与手的距离(未被捡起的量)回输到神经中枢用以调整手部的运动。这是一个由神经系统发向肌肉,而通过身体感受再进入神经系统的环形神经传导过程。当这个过程出了毛病,航海叫做掌舵失控,电子管放大器叫做发生回输振荡,而神经生理学叫做目的震颤。维纳等人正是通过跨学科研究将这些不同学科的概念相互对照相互启发,最后运用数学将它概括起来,成为著名的系统科学反馈定律。对于这种反馈控制条件,艾什比又进一步运用信息论予以证明,并概括为必要的多样性定律或必要的变异度定律(参见本书4.4.3)。

对于系统科学与复杂性的第二次和第三次跨学科研究浪潮,我们已在第2章中做了简略描述。系统科学研究的第二次跨学科研究浪潮是20世纪60年代到70年代关于系统自组织的研究浪潮,就是研究复杂系统、特别是与生命有关的系统的序是怎样形成和怎样保持或增加的。有关这个问题,本来早在1944年薛定谔写《生命是什么》这本跨学科著作时就已经提出。他说:生命以负熵为生,就像是活的有机体从周围环境中吃进了、吸收了一串负熵去抵消它在生活中产生的熵的增量,从而使它自身维持在一个稳定而低熵的水平上。^③这个观点启发了20世纪60年代物理化学家、布鲁塞尔大学的普利高津提出耗散结构理论,研究非平衡态热力学,提出开放

① N. 维纳:《控制论》,郝季仁译,科学出版社1985年版,第2—3页。

② 随意活动:生理学上常使用的名词,指经过大脑皮层反射的、有意识的活动。

③ 埃尔温·薛定谔:《生命是什么》,罗来欧、罗辽复译,湖南科技出版社2003年版,第72页。

系统中“非平衡是有序之源”、“通过涨落而有序”等自组织原理。它的典型例证是对流层和化学钟。与此同时,H. 哈肯是从研究激光理论中提出协同学。生物学家艾根则从生命起源的前生命分子进化的研究中提出超循环理论。无论普利高津的耗散结构理论、哈肯的协同学还是艾根的超循环理论,都是作为化学理论与非平衡热力学理论、激光理论和生命起源理论而提出来的。为此普利高津获得的是诺贝尔化学奖,哈肯获得的是联邦德国总统授予的联邦大十字功勋奖章,是为他的物理学成就而颁发给他的。但 70 年代以后,他们都跨越到其他学科,如生物学、生态学、经济学、政治学、社会学,并分别整合成系统科学的自组织理论。至于系统科学的第三次跨学科研究浪潮,则产生了广义进化论和复杂适应系统理论。它的研究中心之一,就是美国 5 个最有成就的研究所之一:圣菲研究所。圣菲研究所是一个名符其实的跨学科研究所。可见,系统科学、包括复杂系统科学的首要研究方法,就是跨学科研究方法。

▷▷ 5.1.3 逐级上升的跨学科研究方法

以上的分析表明,跨学科研究有三个方法论要求:

1. 它是以分门别类的研究为基础的,在某一专业的专门研究的基础上尽可能熟悉相关学科的某些概念、方法、定律和实验。
2. 在不同专业人员之间进行对相关问题的合作研究和共同讨论。
3. 跨专业提出假说,由相关学科做出实验验证。例如,维纳向神经生物学家罗森勃吕特提出了在神经生理学中也可能存在因反馈过度而造成的疾病,由罗森勃吕特提出目的震颤而得到确证。但是一个典型的系统科学问题、特别是复杂系统科学问题的解决,通常需要经过三个跨学科研究阶段,这三个阶段在历史上也是顺序地发展起来的。

第一阶段:小边缘交叉学科研究阶段,它产生于相邻的两三门传统的学科之间的边缘地带,或虽非相邻但运用一门学科或一类学科的基本概念、实验技术和研究方法到其他学科上去。例如将无线电子学的概念运用于神经生物学中去的早期控制论研究,将新达尔文主义进化论观念运用于计算机的算法研究,都属于小边缘交叉学科的研究方法。

第二阶段:大边缘交叉学科的跨学科研究,这里所谓大边缘交叉学科的跨学科研究,指的是不是自然科学领域内部各学科的相互交叉,如物理化学、

化学物理、生物化学、放射生物学等,也不是指社会科学领域内各学科之间的相互交叉,如经济伦理学、伦理经济学等,而是自然科学与社会科学领域之间的相互交叉研究,如计量经济学、生态经济学、系统管理学的研究等等。在小边缘交叉跨学科研究中得出来的耗散结构和协同学的自组织理论,还必须拿到大交叉学科中进行检验,看它是否可以用于社会复杂系统、社会管理系统,才能成为普遍的复杂系统科学的一般规律。这种应用有时带有隐喻式的、类比性的解释,这当然也是一个很重要的应用。但它也说明这些规律的表述尚未成熟,尚未达到精确的地步,而有待于进一步加以改进。

第三阶段的跨学科研究就是一种综合性学科的出现。所谓综合性学科,指的是以特定的比较复杂的自然界客体、工程技术客体或社会组织管理客体为研究对象,采取多学科的概念、方法和实验、监测、计算技术进行研究而形成的交叉学科群。环境科学、海洋科学、城市科学、决策科学、管理科学都属于这类综合性学科群。它不是一个学科之间的简单交叉,而是一个有交叉、有重叠、有并合的复杂综合体。另外,这种综合学科的出现,不仅是由于学科发展进入边缘交叉领域而引起的,而且是由于人类面临着的迫切需要解决的重大社会问题和技术问题而引起的,这些问题向人类的生存和发展提出挑战。本书最后安排两章讨论社会系统管理的一些主要问题,就是为了探讨系统科学对解决人类生存与发展的重大问题是否能起到应有的作用,能否提供一种新思维,新进路。

►► 5.2 还原与上索,层次分析与综合

传统学科和现代学科都主要是按照物质系统层次来划分门类的。例如传统学科划分为物理学、化学、生物学、技术科学、社会科学等大类,现代科学则更强调按层次将学科联结为一个多层次的统一整体,物理学划分为基本粒子物理学、核物理学、等离子物理学、原子物理学、分子物理学、凝聚态物理学、地球物理学、天体物理学、宇宙物理学;经济学则划分为微观经济学、宏观经济学、生态经济学等。系统科学既然强调跨学科的研究,并在跨学科的研究中诞生出来,它就必然强调用层次之间的区别与联系来分析系统、认识现象,这就导出了层次分析和层次综合的方法,兼容层次还原论、层

次突现建构论、层次上溯解释论和层次整合论。

▷▷ 5.2.1 还原

系统科学承认层次的结构和上向因果关系,就必然承认还原和还原方法。所谓上向因果关系,就是“一个系统的次级结构协同地去影响整个系统”^①。而所谓还原,就是某一较高层次的学科的概念、命题和理论用另一门较低层次的学科的概念、命题和理论来加以理解和解释。这里所说的层次高低对应于本书4.1和4.2所讨论的系统层次的高低。例如,遗传学中基因的变化用DNA分子组成与结构变化来加以解释,这就是说,经典遗传学的一部分命题可还原为分子生物学的命题来加以解释。又如将温度的现象看做是随机运动着的分子平均动能,这就是将热力学问题还原为统计力学问题的一种解释。

一个学科的命题用另一学科的命题来加以解释,这里解释一词有不同的要求,一种要求是后者能说明前者的因果或机制,就算有了解释。例如,某一个基因的变化是由于DNA大分子的排列发生变化引起的。那么,说明了这种因果关系,就算后者对前者有了解释,并不一定要求要由后面的命题在逻辑上严格地推出前面的命题。另一种比较强的要求是,所谓一个学科命题用另一个学科的命题加以解释,就是要由后一命题严格地推出前一命题。在科学方法论或科学哲学的历史发展上,长期以来常常是对还原论证做第二种要求。因此,我们先按第二种高要求来分析理论的还原。

我们在4.1中曾经指出,在本体论上,不同层次有不同的“实体与属性,结构与功能及其特有规律”(4.1.2)。在认识论上,“不同层次有不同层次的概念、语言和描述”(4.1.1)。因此,要使一个被还原理论 T_2 中的命题 L_2 能还原为 T_1 中的命题 L_1 ,即由 L_1 推出 L_2 ,就必须有一种规则将出现在 L_2 中的概念用 T_1 中的概念来进行定义。因此,理论还原的第一个条件就是概念还原,即将一个被还原学科的概念用另一个学科(还原学科)的概念来进行定义。由于不同层次之间的密切相关,特别是由于存在着上向因果关系,这种跨学科的定义是能够找到的。不过这里特别要提醒大家注意的是,这种跨学科定义并不是随意或约定给出的,而是长期的科学实验和探索

① K. 波普:《自然选择和精神的出现》,载《自然科学哲学问题丛刊》1980年第1期。

的结果。例如温度的概念,在气体分子运动论这个深层理论出现之前,人们直观地将它理解为水银柱的高度。分子运动论出现之后,人们用统计力学的概念对它进行理解,将它定义为随机运动着的大量分子的平均动能。下表列出的是概念还原或还原定义的一些实例。

表 5.1 概念还原或概念的跨学科定义实例

被还原概念	跨学科定义
温度(热力学)	分子的平均动能(统计力学)
光(射线光学)	电磁波(波动光学)
化学反应(化学)	原子、分子的结合、分离与取代(物理学)
尿素(生理学)	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N} - \text{C} - \text{NH}_2 \text{ (化学)} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
基因(经典遗传学)	DNA 大分子中的一个片断(分子生物学)
精神状态(心理学)	神经系统的某种状态(神经生物学)
消费者愿意付出的价格(经济学)	边际偏好值(心理学)

现在,我们来讨论命题还原或规律还原(这里规律被看做是某种一般命题)。所谓命题还原,就是一个学科的命题用另一学科的命题来加以表示或加以推出。有了以上所说的跨学科定义(在科学哲学中叫做桥接原理)之后,高层次的、宏观的规律命题便可以由低层次的、微观的规律命题进行定义,有时还原必须附加上一些辅助假说才能加以推出。例如热力学中的理想气体定律,即波义耳—查理士定律 $PV = kT$,就可以从粒子力学运动定律加上还原定义或跨学科定义以及某些辅助假说推出。这些还原定义是:“热是分子的运动”,“温度是分子运动的平均动能”,“压强是分子在单位时间里对单位面积的容器壁上的冲击力”等。这里的所谓辅助假说是“分子之间是混乱无序的”,它描述了低层次规律在高层次宏观事物中发生作用的条件。又如,对于经济学中的商品的均衡价格的定律,人们可以从消费者和出售者的边际偏好的心理规律中,加上完全竞争和完全信息的自由市场假定(辅助假定)加以推出。写成一个公式就是:

$$T_1 \& D \& C \vdash I_2$$

这里 T_1 为还原理论, I_2 为理论 T_2 中的一些命题和规律, D 为与 I_2 相

关的概念的跨学科定义, C 为说明高层次条件辅助假说。“&”表示“合取”, 是“与”的意思。“ $\vdash$ ”表示演绎推出。这里需要特别注意 C 项, 因为它不包含在 T_1 中, 所以, 上式的规律还原是不完全的还原, 只是部分的有条件的还原。

有关概念还原、规律还原和理论还原的探索, 无论对于传统科学、边缘科学还是系统科学都是十分必要的。当一门学科(T_2)向另一门学科(T_1)还原时, 无论是完全的还原还是部分的还原, 都会加深对 T_2 、 T_1 两门学科理论的理解。对于 T_2 来说, 它由表到里, 对现象进行穷根究底的认识, 揭示了 T_2 理论领域的实质和机制; 而对于 T_1 来说, 这种还原扩大并推广了自己的理论, 增加了自己的解释力和预言力。因此, 系统方法或系统科学方法并不拒斥还原论和还原方法, 而是它本身就包含了还原论和还原方法。我们在以后各章中将会看到, 在研究复杂性、自组织和复杂适应系统时, 我们同样使用了在科学中行之有效的还原方法。

▷▷ 5.2.2 本层现象的分析和建构

但是, 我们应该注意在历史上和在现实的科学研究中有一种极端的还原论, 我们不妨称它为终极还原论或激进的还原论(radical reductionism)。它主张任何一个高层次的学科, 其所有概念、假说、规律和理论都最终可以还原为低层次系统的学科来加以解释, 或从低层次的学科中完全推出, 从而达到科学的统一。用奥本海默(Paul Oppenheim)的话说, 就是“所有科学词项都还原为一门科学(例如微观物理学)的词语”, “所有的科学规律都还原为某一门科学的规律”, ^①都成为物理学的一个分支。这种观点事实上是不可能的, 也是不必要的, 理由如下:

1. 一门学科能否完全还原为另一门学科, 要看这门学科的全部科学术语是否能用另一门学科的术语来下还原定义, 即使这种定义不要定义项与被定义项内涵相同, 而只要求外延的一致。这事实上是很难做到的。例如生物学的术语“鹅蛋”、“视网膜”、“有丝分裂”、“同性恋有遗传学的根源”, 就很难用物理学、化学的术语来表达和定义。事实上, 在目前的生物学中,

① Oppenheim, Paul & Putnam, Hilary (1958) "Unity of Science as a Working Hypothesis". in *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. II.

只有很少一部分术语能做出还原定义。即使已做了还原定义的术语,仔细加以检查则仍有许多不严格之处,例如将尿素定义为 $\text{H}_2\text{N} - \text{C} - \text{NH}_2$

$$\begin{array}{c} \parallel \\ \text{O} \end{array}$$

的化学结构式虽然是很科学的,但定义项的化学术语不但丢失了尿素的原义,而且在外延上也不严格一致。因为尿素的含义本来就不包括那人工合成的东西,这样定义实际上已扩大了尿素概念的外延。至于将基因还原定义为“DNA 的一个片断”,并将“一个基因决定一个遗传性状”的经典遗传学命题还原为“一个 DNA 片断决定一个遗传性状”,这种还原事实上是很不严格的,基因变异和交换的单位并不是“DNA 的一个片断”,而是核苷酸分子。更为重要的是,近年来发现,与一个遗传性状相对应的“基因”并不对应“DNA 的一个片断”或核苷酸的某一个序列,而是对应着许多不同的“片断”和“序列”,以及合成蛋白质的过程中的复杂的相互关系。例如,一个人又细又软的黑头发到底与其基因组哪些密码相对应便几乎无法做出还原定义。一旦没有足够的根据说明一个学科的全部术语都可以用另一学科的术语来定义,还原就不可能是全部的,而只能是局部的。

2. 一门学科能否还原为另一门学科,还依赖于还原是否要附加上不在还原理论中出现且不能由还原理论直接推出的高层次条件。而事实上这些条件总是要附加上去的,例如,如果不附加上“高度组织的有机体”以及“遗传密码”这样的条件,单用物理化学的规律是不能解释遗传现象的;不附加上完全竞争和完全信息这样的经济学条件,那个主观偏好的心理规律是不能解释均衡价格的市场经济学规律的。而一旦附加了这些条件,还原就不是完全的、严格的还原,而只可能是相对的和有条件的还原。

3. 多重实现问题。所谓多重实现,就是某一理论领域所讨论的某种事物的性质或状态,可以由低层次理论领域所讨论的多种不同事物的性质或状态来加以实现。哲学家普特南在 20 世纪 60 年代就发现动物界中同一种心理类型,例如肿痛,可以用各种不同的动物来实现。例如人、其他灵长类、哺乳动物、鸟类、爬行动物、两栖类甚至软体动物都可以感到痛。神经解剖证明,它们的痛感觉没有共同的神经结构,那么将痛这种心理概念还原到哪种神经结构上去从而做出还原定义呢? 没有哪一个还原定义是充分的并且必要的,因而痛是不可能做出还原定义的,所以就多重实现的关系来说,还原总是局部的和不完全的。

综上所述,理论之间、学科之间的还原只能是不完全的、局部的、相对的和有条件的。还原论和还原方法的局限性主要是由于不同的系统层次各有自己的概念、规律和因果关系,不同的系统层次有不同的类概念,反映着这些层次的本质特征,在哲学上称为“自然类”。例如生物学中的食肉动物、食草动物、杂食动物就是自然类,食肉动物中的狮子、老虎、河马、海豹等就是这样的自然类,它们之间存在着食物链的因果关系和规律。在化学层次中存在着由门捷列夫周期表给出的氢、氧、氮、铁、锰等一百多种元素以及几千万种化合物的自然类,这些类之间的关系反映了化学变化的因果关系。科学的概念主要反映自然类的概念,科学规律主要反映自然类之间的关系。因此用一种自然类的术语与命题去定义和表达另一种自然类的术语和命题并不总是可能的,更不总是必要的。用老虎吃羊,用物种之间的食物链关系和生态平衡来表达这种宏观规律就足够简明清楚,但如果一定要用而且只能用原子、分子之间的相互作用来表达这种宏观规律,就恐怕永远没有人能表达得清楚,即使能表达出来,也永远没有人能理解这几十亿个原子处于几十亿个状态到底表示了什么意思。因此,任何一个系统层次都需要用本层次的类词来分析本层次的现象,建构本层次的规律。在这个意义上,各个学科的理论有自己的自主性。

▷▷ 5.2.3 上索

所谓理论上索,也是一种跨学科研究方法,不过它与还原方法正好相反。前面说过,所谓还原,就是对某一较高层次的学科(例如生物学)的概念、命题和理论用另一门较低层次的学科(例如物理、化学)的概念、命题和理论来加以理解和解释。这种理解和解释是将系统的基本元素看做是理所当然的前提,并试图用元素以及元素之间的相互关系与相互作用来解释整体。与此相反,所谓上索就是某一低层次学科(例如物理学和化学)的概念、命题和理论用另一门较高层次的学科(例如生物学与生态学)的概念、命题和理论来加以理解和解释。这种理解和解释是将系统的整体视为理所当然的前提,用整体来解释部分的行为。这种向整体求索的研究方式反映了系统的概念和系统科学研究方法,有人称之为反向还原(例如邦格),有人称之为脉络解释,有人称为扩展主义(Expansionism)。我们则称之为上索,主要是受屈原《楚辞》中的诗句“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”的

启发。下索就是还原,用系统科学家的术语来说是所谓从外到里的思想方法(Outside-in thinking),而上索就是从里到外的思想方法(inside-out thinking)。例如犯罪率问题,犯罪当然要由警察来解决(本层次研究),也可以通过分析罪犯的基因来研究和确认罪犯,这就是犯罪基因研究和DNA身份测试(还原方法研究)。但越来越多的警察,借助越来越奇妙的侦察技术,虽然可以减少大都市贫民区的犯罪率,但却不是一个根本解决问题的方法。因此,有必要向整体求索,向更广泛的系统求索,把它看做一个与经济、社会、就业和教育有关的问题,犯罪问题就可在这个脉络中得到解释。这种脉络的解释和上索的研究也可以从组织行为学的调查、实验中得到检证。S. 罗宾斯(Stephen P. Robbins)的《组织行为学》(Organizational Behavior)里面有一段话:“我们的价值系统从何而来?有一个明显的组成部分是基因决定的,其余的是由这样的因素决定的,如国家文化、双亲的言传身教、教师、朋友以及类似的环境的影响。研究出生后就分开的同卵孖生兄弟姊妹的行为证明价值观念的不同有40%可以用遗传来解释,所以解释你有什么样的价值观,你的生物学父母起着相当重要的作用。但是,价值观念及其变迁主要来自环境的因素”,^①即有60%需要用社会及其环境的因素来进行解释。与这种研究相对应,对于人的本质,有两个跨学科定义。一个是还原论的跨学科定义,是著名的英国生物学家R. 道金斯在《自私的基因》中表达的:“人不过是基因的运载工具”。另一个是扩展论的跨学科定义,是长期生活在英国的经济学家马克思在《关于费尔巴哈的提纲》中指出的,人的本质是“一切社会关系的总和”^②。如果我们假定研究人的心理与行为的心理学学科是中间层次学科(T_2),而社会学是比它高一个层次的学科(T_3),生物学是比它低一个层次的学科(T_1),则理论上索的公式可以表述如下:

$$T_1 \& D_1 \& C \vdash L_2$$

① Stephen P. Robbins, *Organizational Behavior*. Prentice-Hall International, Inc., 1996. 清华大学出版社英文版, p. 175。其中双胞胎实验资料来源出自 L. M. Keller & et. al “Work Values: Genetic and Environmental Influence” *Journal of Applied Psychology* (Feb. 1992) pp. 79-88.

② 马克思:《关于费尔巴哈的提纲》,《马克思恩格斯选集》第一卷,人民出版社1995年6月第2版,第56页。

这里 L_2 是低层次学科规律,如犯罪行为心理规律; T_3 是社会学理论。社会学理论并不讨论心理现象与行为,如犯罪动机与犯罪行为的关系,因此,要从犯罪动机上索到社会学进行分析,需要有一个功能主义的上索定义,如“人的本质是社会关系的总和”、“个人是社会制度的产物”作为它的支撑。这个功能主义定义起到还原论模式中的“桥接原理”的作用。这里 C 是特定行为起作用的条件。例如,恰好发生大火,犯罪者趁火打劫。

下面,我们仿照表 5.1 构造一个表 5.2,说明概念的上索和功能主义的定义。这些功能定义将在下一节中具体分析。

表 5.2 概念上索和功能主义定义实例

被上索的概念	功能定义
心脏	进行血液循环以供给身体所有细胞以营养的器官
肾脏	从血液中过滤毒素并保持特定的化学平衡的器官
个人	社会关系的总和
精神状态	人类行为的倾向,社会文化的产物
思想	产生进一步的内部状态和语言输出的系统状态
货币	人类劳动的社会化身,商品流通的手段与媒介,社会财富的符号

在自然科学中也有许多典型事例说明这种上索研究。大家知道,在无生命物体的热力学运动中,温度的变化可以从绝对零度即 -273°C 至几千亿度。但如何解释恒温动物例如人体的体温变化,即使环境已是千里冰封的时候,他的体温仍保持 36.7°C 左右呢?当然这不违反物理化学规律,但是单从物理化学规律是不能得到解释的。我们必须上索到动物学的机制来进行解释。这里包括神经系统的调节作用,新陈代谢速度加快的生理作用等等。再来看看化学能转变为光能的物理化学变化。点燃一根蜡烛,化学能变为光能的效率极低,大部分能量转变为热而耗散了。可是在萤火虫中,由于神经系统的调节以及萤光酶这种生化酶的作用,萤光素在水的参与下,与氧化合产生萤光,化学能转变为光能的效率竟达到 100%。怎样解释这种化学光学效应呢?除了上索到生理学层次加以理解之外,别无其他方法。

►► 5.3 功能分析与黑箱方法

在对复杂系统的研究中,例如在对生物机体、心理现象、社会生活、社会管理的研究中,常常要用到上述的层次上索方法,即将一个现象放在一个更大的系统整体中去分析它的地位、作用、角色与功能。从这个整体脉络中去认识事物的研究,形成了一种思潮叫做功能主义(functionalism),也称为功能分析(functional analysis),它是系统方法的重要组成部分。它在若干学科中占了重要地位,例如,社会学中的功能主义,文化人类学中的功能主义,语言学中的功能主义,现代工程设计、特别是建筑设计中的功能主义,最为典型的是心智哲学与人工智能的功能主义。本节将略述功能主义的要旨。

▷▷ 5.3.1 生物学中的功能分析

我们在3.2.2中曾讨论指出,“一般系统的功能是在系统与环境的相互关系中表现出来的行为、特性与作用,即它与环境的输入与输出的关系”,但这里的环境主要指的是系统的周围环境,即“包含了它(作为子系统)的上一层次系统”。现在,我们将功能的概念稍加具体化就会得出这样的结论:从一般系统的观点看,所谓一个事物或一个子系统的功能,就是它对于系统其他部分所起的作用,它在系统整体的生存与发展中所充当的角色,以及它曾经起到、现在还起到、并且将来它所应当起到的作用。这样,一个有机体的器官就可从它在整体中的功能得到认识和定义。例如,什么是肾脏,除了像上节所做出的还原定义(它是具有某种解剖学结构的器官)外,还可以做出功能分析和功能定义,指出“它是从血液中排除各种废物的器官”,这个功能分析是很有用的。我们在3.3.2中曾经分析过,某人患了肾炎,他的肾脏的功能不能起到它“应有的”作用,就可以用一个血液透析仪来替代它的功能。又如我们可以将心脏功能定义为进行血液循环以提供全身所有细胞的营养、从而保证人体的生存和发育的器官,我们也可以将叶绿素定义为能使植物进行光合作用从 CO_2 中形成淀粉的物质等等。当然,生物体以及其他复杂系统的功能仍然可以划分为两类,一类是有目的性、有意向性的功能,哲学上称之为目的性功能(Teleologic function),另一类是无目的性、

无意向性的功能。有关这个问题,在我们分析社会组织功能时会讨论得更加清楚。

为什么必须对生物的现象、特征、行为和器官做功能分析呢?哲学家黑格尔在他的《小逻辑》一书中曾经做过很生动的说明。他说:“一个有机体的官能和肢体并不能仅视作有机体的各部分,惟有在它们的统一里,它们才像它们那样,它们对于那有机的统一体是互有影响,并非毫不相干的。只有在解剖学者的手里这些官能和肢体才是机械的部分。但解剖学者的工作乃是解剖尸体,并不在于处理一个活的身体。这倒并不是说科学家这种分解工作不应该有,这只是说,如果我们要研究有机体的生命的真理,那种整体与部分的外在的机械的关系尚欠充分罢了。”^①这是对系统科学的功能分析的必要性的一种很好的表达。一个系统整体不能还原为各个部分之和,一个生命有机体不能还原为各个器官的总和,对器官的了解一旦做这样的肢解,器官的许多本质属性也就丧失了。18 世纪的黑格尔的观点与 20 世纪研究复杂系统、包括社会系统的许多功能主义者的观点是一致的。社会学家帕森斯就说过:“功能是理解所有的有生命体系的中心概念”。^②

▷▷ 5.3.2 社会学中的功能主义

社会学中的功能主义起源于 19 世纪英国社会理论家斯宾塞。他将社会比作生物有机体,而社会已演化到了这样的程度,其每一个组成“器官”都对社会的生存与持续起到正面的作用。对社会现象的研究以生命有机体为隐喻进行类比,几乎是所有功能主义社会学家的共有特征。不过,经过 20 世纪一大批社会学家的实证研究和理论概括,这门学科已经超越了隐喻和类比的阶段,建立了自己的理论模型。其代表人物有法国社会学家涂尔干(Emile Durkheim),波兰人类学家马林诺夫斯基(Bronislaw Malinowski)。20 世纪 60 年代结构功能主义社会学达到它的极盛期,功能主义几乎是社会学的同义语。其代表人物是 T. 帕森斯,被誉为“20 世纪社会学理论的领军人物”或“中心人物”。^③ 70 年代后,功能主义社会学走向衰落,但 80 年

① 黑格尔:《小逻辑》,贺麟译,商务印书馆 1959 年版,第 290 页。

② 帕森斯《关于社会学中一般理论的若干问题》,转引自玛格丽特·波格玛《当代社会学理论》,孙立平译,华夏出版社 1989 年版,第 134 页。

③ Malcolm Waters:《现代社会学理论》,杨善华等译,华夏出版社 2000 年版,第 143 页。

代至现在,在哥伦比亚大学社会学教授杰弗里·亚历山大(Jeffery C. Alexander)和著名德国法兰克福哥德大学哲学教授、当代思想家哈贝马斯(J. Habermas)的支持下,又有很强劲的复兴趋势。

社会学功能主义的基本论点是:社会是一个系统整体,它对于它的个体行动者来说具有自主的、自成一体^①的实在性,并对于个人和社会子系统施加一种决定性的控制、约束与影响。例如,帕森斯认为:“人性并不是天生的,而是社会过程(起初是家庭)‘制造’出来的”。^① 社会系统的各个组成部分对于社会的存在与发展有着不同程度的专业分工,从而相互依赖与相互关联,形成一个有序的自我维持的整体(动态均衡系统)。因此,社会现象、社会组织、社会单元只有借助于它在社会的相互联系的整体中实现什么功能、对社会整体的协调起到什么作用、对社会的存在和发展满足了什么样的需要才能得到解释。社会如何对个人与社会子系统施加决定性的影响、以至于为了了解个人或子系统必须上索到社会整体来做功能分析呢?社会学的功能主义者大致提出了下列几个要点:

1. 人们生活^②在社会中,有一系列行为方式是社会预先给定的。文化关系、经济关系、法律制度、社会道德与习俗像“剧本”一样规定一个人能做什么、不能做什么。你必须到商店买东西而不是拿东西,你必须受制于社会文化的各种规范,这些都不是个人建构或选择的,而是社会整体的建构。

2. 个人的品质与行为是受他的地位与角色决定的。所谓“地位”就是他在社会系统中所处的位置,比如教师、父亲和总统,而所谓“角色”就是附着于诸如教师、父亲或总统地位上被期望的行为、被规范的行动和要履行的义务。所以不但一般行为受制于社会规范,特殊角色的行为也受制于社会规范。

3. 社会是一个有机体,它的正常情况是处于一种动态均衡或稳定的有序状态。因此这个秩序就是社会系统的规范规定了各子系统起什么作用。所有的基本的子系统如果不满足这个稳定有序性的要求,社会就将调整到使它满足这个有序性的要求,从而使各子系统达到功能整合。当代社会学功能主义者将它称之为类似于“帕累托均衡”的东西。用现代系统观点分

^① T. Parsons, *Family, Socialisation and interaction Process* Glencoe. 111. The Free Press, 1955, p. 16.

析,就是通过负反馈达到的适应性自稳定和通过涨落、分叉达到的适应性自组织。因此,社会子系统必须按它在社会系统整体中的贡献和作用来做分析。

现在我们来简述社会学的功能主义代表人物帕森斯的基本观点,着重讨论其中两个问题。(1)个体行动是如何被制度化的,(2)社会系统要实现哪些基本功能。

社会系统是按照一定目标进行行动、发生特定相互关系、承担不同社会角色的社会成员的集合体。家庭、村落、企业、民族、国家等社会组织都属于社会系统。因此,研究社会的出发点是个人的行动。这行动是有目的、有意志的行动,是目的定向和价值定向的。不能单独理解为工具理性人,也不能单纯理解为道德伦理人。他提出了人的行动由五个要素组成。

1. 行动者(agent 或 actor):这是要达到自己目的、实现自己价值的个人。
2. 行动者的目标。
3. 行动者达到目标的各种手段。
4. 影响目标和手段选择的环境,包括自然因素以及其他行动者。
5. 支配目标手段选择的价值观念和行为规范,它是“大多数人共享的整个价值体系”。^①

这五个要素的关系,可用下列线性的图形来表示(见图 5.1)。

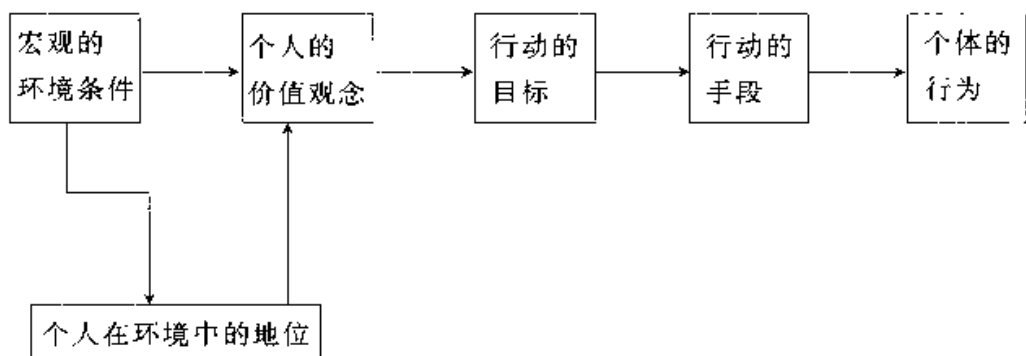


图 5.1 个人行动的价值导向和目标定向

^① T. Parsons. *The Structure of Social Action*. New York: McGraw-Hill, Free Press, 1937, p. 704.

这个图形表明,人的活动与行为是价值导向和目的(或目标)定向的,而人们的价值观念又受到各种环境、特别是社会环境及其在社会环境中的地位制约。

这五个要素如果用 一个网络的图形来表示,那就是图 5.2 的形式:

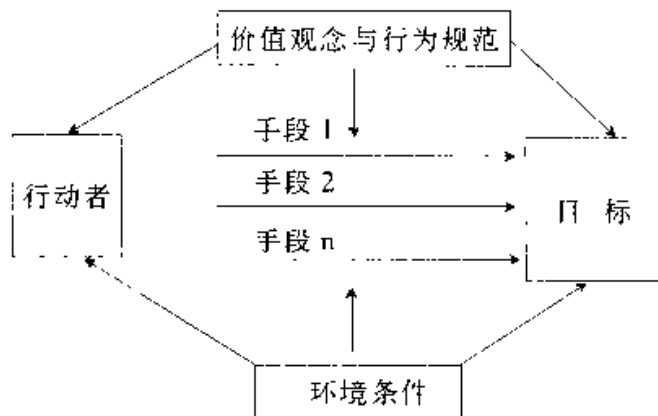


图 5.2 个人行动的组成和结构

正如帕森斯说的:“必须始终认为,行动包含着规范秩序的元素与属于条件秩序的元素之间的紧张状态。行动作为一个过程,其实就是以遵从规范为方向而改变条件元素……这样,就可以把条件视为一极,目的和规范性准则为另一极,而手段和努力则为两极之间的关联纽带。”^①可见,帕森斯对个人行动的研究不是方法论上的个人主义,而是从个人行动的研究中揭示出它的社会规范的制约。

帕森斯提出,各种具有不同价值取向的行动者之间相互交往、相互竞争,他们彼此依共同的目标进行分工合作,以及由这些交往、分工、合作而形成不同的社会角色。而图 5.2 中的个人目标便整合成为共同目标,成为共同目标的不同组织部分或子目标,这个子目标不是个人单独决定的。而图 5.2 中的选择手段以达到目标的活动便构成了个人对达到共同目标的一种奉献。由于共同目标的达到,从而使个人的价值得以实现和个人需要得到满足,又推动社会的不同的角色为完成自己的任务而努力工作。于是图 5.2 中的“价值观念与行为规范”便转化为图 5.3 帕森斯所说的特定社会组

① T. Parsons, *The Structure of Social Action*. New York: McGraw-Hill, Free Press, 1937, p. 732.

组织的“制度化的规范”,以解决个人对组织的贡献问题、组织对个人的回报问题以及多元化角色之间的责任平衡问题。这“制度的规范”又由特定的文化模式来加以维持,于是不同个人行为的社会整合,便从图 5.2 变成了图 5.3。图 5.3 略去了宏观环境条件的影响和作用。

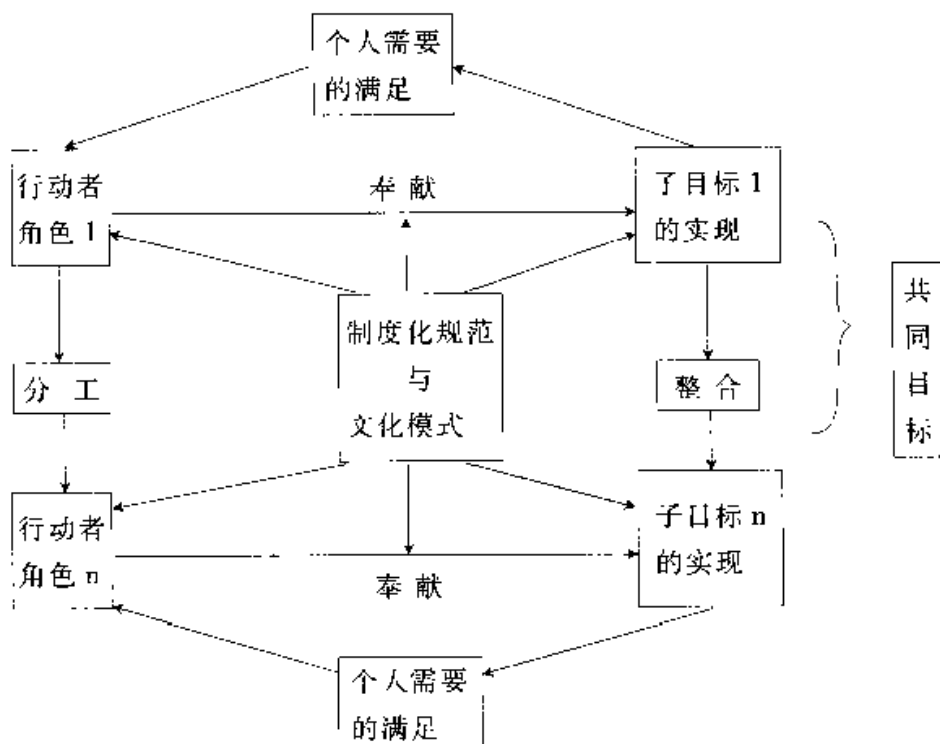


图 5.3 个人行动的制度化和社会化

从以上的分析可以看到,个人的行动就这样被制度化了。个人是被制度化了的人,它根据角色系统的要求而行动。这些制度化的形式就是社会系统。当一个社会系统很大,由许多相互联系的制度化形式组成,这些制度就成为它的子系统。那么社会系统由哪些子系统组成呢?这就必须从功能上来进行分析了。这里所谓从功能上进行分析,就是要分析任何一个社会(无论大小)要生存必须满足哪些基本的需要,即功能需要(functional requirement),又称为功能命令(functional imperatives)。而它的内部组成部分或子系统就会为满足这个需要而进行分工,甚至专业化,从而划分为几个功能部分。根据帕森斯的分析,这些功能需要和相关的功能部分有四个:(1)适应:适应它的自然的或社会的环境。(2)达标:规定主要目标,并动员参与社会或组织的个人来努力达到这个目标。(3)整合:解决如何调整系

统的各个部分使之成为一个有内聚力的功能整体的问题。(4)维模:指的是一种潜在的促使个人实现他被社会所期望的、在组织或社会中的角色的维系作用。对于社会大系统来说,它的基本功能及其实现者可做如下的分析:

A——适应(Adaptation):一个社会大系统是开放系统,它首先要适应环境,就要从环境中获取资源,然后将它们分配到整个系统中以产生各种产品,为其他系统所用。这是一个资源的投入产出和分配问题,执行这种功能的主要是社会的经济系统。一个社会的进化主要表现在它的适应性的提高,即物质生产效率的提高、社会控制环境能力的提高。

G——达标(goal attainment):达标首先要确定社会大系统的目标,其次就是通过权力与决策来确定如何达到目标的手段——宏观调控系统资源的使用,控制外部力量的冲击,动员参与社会的个人努力达到共同的目标。这是社会政治系统的主要功能。

I——整合(Integration):它的任务或功能就是要将社会成员整合到社会组织中,最后整合到一个大系统中。其中,社区的作用,各种社团或社会共同体的作用,特别是法律的作用,是主要的整合力量。它的力量的源泉就是社会规范。那些自发的社会组织在社会整合中到底起着什么样的作用,也是一个值得探讨的问题。

L——维模(Latency: Pattern maintenance):它是社会大系统中一个调整个人与社会的紧张关系以使社会得到和谐稳定的潜在力量。它主要体现在价值观念和理想信念上,它们的主要执行者就是社会文化教育和道德伦理系统。

以上的分析只是 AGIL 在社会系统中的表现,简而言之,就是:(A)经济资源;(G)政治目标;(I)规范;(L)价值观。从能量供应的条件顺序来说,是 $A \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow L$, 而从信息调控的观点来看,其顺序恰好相反,是: $L \rightarrow I \rightarrow G \rightarrow A$ 。

当然,社会经济系统、政治系统、法律系统和文化系统并非机械地按照帕森斯的四分法行事。但是对社会子系统必须从它对于整体所起的作用和整体给予的“功能命令”、“功能要求”和“功能先决条件”加以理解,这种功能主义方法论应该看做系统方法论的一个重要组成部分,也许对于所有的复杂适应系统研究都有方法论意义。或如帕森斯所说的:“这个四功能方

案是以处于从单细胞有机体到最高的人类文明的所有组织和进化发展水平上的有生命系统的基本性质为依据的”。^①

▷▷ 5.3.3 心智哲学和认知科学中的功能主义

心智哲学 (philosophy of mind) 与认知科学 (cognitive science) 要解决的根本问题就是心物 (body/mind) 关系问题。我们的精神状态、意愿、信念、思想、感知等等到底是什么东西? 二元论者说, 它是一种非物质的精神实体; 物理主义者说, 它不过就是最高发展起来的物质, 即大脑的一种状态; 而行为主义者则认为, 精神不过是行为的一种倾向。这些观点虽然各有一些道理, 但都不能很好地解决心智的本质问题, 不能与现代科学、特别是计算机科学发展相协调。最近几十年来发展起来的一种心智哲学和认知科学的功能主义, 在系统科学方法论上有其根源。这种观点认为: 要认识什么是意识, 什么是精神状态, 追问它由什么物理实体及其结构来实现, 这不是本质性的问题, “精神状态之所以是精神状态, 那是因为它是由它们之间的因果关系以及它们与感觉输入和行为输出的因果关系所组成。”^②

心智哲学中的功能主义方法与生命科学中的功能主义方法和社会学中的功能主义方法一脉相承。要回答汽车中的一个汽化器是什么, 我们完全可以不问它的结构, 而只问它在汽车运行这个整体中起什么作用。汽化器就是混和空气与燃料使其均匀燃烧的装置。而肾脏又是什么呢? 我们不必对它进行解剖而只就它在一个大系统中的作用来定义它: 肾脏是一个滤清血液的毒素并保持其中化学平衡的器官。这个功能主义定义有一个好处, 就是当一个人的肾脏出了大问题的时候, 我们可以用一个人工肾脏或一个其他动物的肾脏来代换。只要它具有同样的功能, 它们便是等价的。心智哲学和认知科学的功能主义方法主要是从计算机的研究中获得启示与支持。而当今一切计算机的原理都逃不出 20 世纪 30 年代图灵提出的最简单

① 转引自玛格丽特·波洛玛《当代社会学理论》, 孙立平译, 华夏出版社 1989 年版, 第 136 页。

② Ned Block. “What is Functionalism?” in *The Encyclopedia of philosophy Supplement*. Macmillan, 1996, [Http://www.nyu.edu/gsas/dept/philo/faculty/block/papers/functionism.html](http://www.nyu.edu/gsas/dept/philo/faculty/block/papers/functionism.html).

的图灵机的原理。因此讨论心智哲学和认知科学的功能主义,就需要从图灵机的原理入手。

图灵机并不是一台现实的机器,而是一台想像的机器。它由一条刻了格子的无限长的纸带、一个读写头、一个装有程序即“状态变换表”的控制器三个部分组成。纸带上每个格或者是“空”的(0),或者写上“1”,它通过读写头的“读”成为图灵机可能的输入。

图灵机依据输入以及它自身的状态决定其读写头上的“写”以及转向下一个状态等输出。图灵机的输出只有五种:

1. 读写头右移一格(R)。
2. 读写头左移一格(L)。
3. 擦去读写头框住的格子中的记号,即腾空(B)。
4. 写上1(1)。
5. 停机(H)。

不要小看纸条上只有“1”与“空”,即1与0两个符号,你也可以写上任何符号,如26个英文字母中的1个或10个阿拉伯字母中的一个,其结果使图灵机运作复杂得多,但并没有使它增加什么功能。

我们讲了图灵机的输入和输出。我们只差一个问题,就能完全描述图灵机,那就是它所处的状态及其变换。当输入确定时,图灵机的状态决定了它的输出以及它走向哪一个状态。怎样决定法?这就要有一个指令系列(lists of instructions)或有一个机器表(machine tables)。假定我们要用图灵机从空带出发连写三个“1”。

用指令系列来表示:

1. 若处于状态1,并遇上空格B,则写上1并保持在状态1。
2. 若处于状态1,并遇上1,则右移一格并转入状态2。
3. 若处于状态2,并遇上B,写上1并保持在状态2。
4. 若处于状态2,并遇上1,则右移一格并转入状态3。
5. 若处于状态3,并遇上B,则写上1并保持在状态3。

若处于状态3,并遇上1,机器不给出任何指令,这表示停机。

用机器状态表来表示,则有下列表格,它完全等价于上述的指令序列。

表 5.3 图灵机状态表例举

状态 输入	状态 1	状态 2	状态 3
B	写上 1; 停留于状态 1	写上 1; 停留于状态 2	写上 1; 停留于状态 3
1	右移; 转入状态 2	右移; 输入状态 3	[停机]

那么什么是图灵机的状态? 我们完全不必要提及图灵机器由什么东西组成以及机器的结构是什么。它可以由各种不同的材料组成, 可以有非常不同的建构。我们只需说明如果它有某种输入(I)并处于某种状态(S_m), 则它有某种输出(O)。于是图灵机现时的状态 S_n 可以功能地定义为:

$$S_1 \stackrel{df}{=} F(S_m, O, I,)$$

例如, 在上例中, 关于图灵机的状态 1 即为: $S_1 \stackrel{df}{=}$ 机器处于这样的状态, 当其输入为 B 时, 写上 1 并停留于 1 的状态; 而当其输入为 1 时, 右移一格并转入下一状态。

在逻辑上用存在量词来表示这个语句则有:

$S_1 \stackrel{df}{=} \exists (x)$ 使得 $\exists (P) \exists (Q)$ [若 x 处于 P 状态以及输入为 B, 则写上 1 并停留于 P; 若 x 处于 P 状态以及输入为 1, 则右移一格并转入状态 Q。]

仿照图灵机的功能定义, 对于所有的心理状态或精神状态, 便可以不问其精神状态为何物而藉助于感觉输入、行为输出和其他的功能状态来定义。现在, 我们用一个刺痛的实例来说明怎样对痛苦进行功能分析和功能定义。假定你不小心坐在一颗图钉上, 被图钉的刺伤引起一种疼痛, 而疼痛引起一种焦虑, 导致肌肉收缩, 跳将起来并大叫一声“哎呀!”。依照大众心理学的理论, 痛就是处于两种状态: (1) 图钉刺入引起痛; (2) 痛引起焦虑、肌肉收缩等状态, 并大叫一声“哎呀!”。比较形式地表达就是:

痛 $\stackrel{df}{=} \exists (x)$ 使得 $\exists (P) \exists (Q)$ [(坐上图钉引起 P) & (P 引起 Q 并发出“哎呀”一声) & (x 处于 P)]

这里符号 P 表示痛, Q 表示焦虑。这里 P 与 Q 都是表示精神状态的词, 是在某种心理学理论的语境中使用的。为了使这个功能定义更形式化, 心理学的功能主义者使用分析哲学中拉姆齐语句 (Ramsey Sen-

tences)①消去理论词 P 与 Q。其方法如下:

设 T 为有 n 个精神术语的理论,其中第 17 个术语为“痛”。我们可以相对于理论 T 定义“痛”如下:

痛_{df} = 某 x 使得: $\exists F_1 \dots \exists F_n [T(F_1 \dots F_n, i_1 \dots, Q_1 \dots) \& x \text{ 处于 } F17]$

这里‘F₁’, ‘F₂’……‘F_n’为一些变量以替换精神术语 P、Q 等等,而 i₁, i₂……为输入, O₁, O₂,……为输出。

运用功能主义分析精神现象有许多优越性:(1)它克服了还原主义的物理主义的局限性。物理主义者只承认精神状态等同于大脑的某种状态,例如痛等同于 C 纤维神经丛受到刺激。功能主义则指出还原论的精神学说是不够的。可以完全不涉及微观的物理机理来讨论精神问题,而代之以从整体的高层次的功能(如信念、愿望、动机等)以及不同功能之间的复杂相互作用来说明精神问题。(2)它容许精神现象的多重实现。例如不但地球上的生命可以实现精神现象,在其他星球上可能由其他材料组成的非生物非入脑的系统也可能实现精神现象。事实上,在医学上发现“半脑人”也能实现正常人的所有精神功能,这说明精神状态与物理状态或神经状态并非是一一对应的。(3)功能主义认知科学为人脑的研究与计算机的研究之间建立了跨学科的模拟与类比,使得“人工智能可以具有意识与心灵”、“认知就是一种计算”这样的命题在某种意义上越来越得到确认。

▷▷ 5.3.4 黑箱方法

上面所讲的生物学、社会学和认知科学中的功能主义在研究方法上有一个共同特点,就是将所要研究的现象放到一个更大的系统整体中去进行研究,考察它在这整体中以及整体的其他事物中的地位、作用与功能。检查客体对环境的输出以及这种输出对于输入的种种关系而“把客体的特定结构和内在组织略去不谈”,②这种方法常被称为黑箱方法。它是一种对复杂事物的研究方略(A strategy for investigating a complex object),由于这种方

① Curtis Brown, Functionalism, philosophy Department, Trinity University, U. K. <http://WWW.trinity.edu/cbrown/mind/functionalism.html> 2000.

② N. 维纳(1943):《行为、目的和目的论》,载于庞元正、李建华编《系统论、控制论、信息论经典文献选编》,求实出版社 1989 年版,第 281 页。

略是在不知道或不假定事物的内部组成及其结构的情况下进行的,所以叫做黑箱方法。

黑箱一词,起源于电机工程,给电机工程师一个密封的箱子,箱子上面有些输入的接头,可以随意通上各种电压、电脉冲或其他干扰,它的上面还有一些旋钮可以任人随意摆弄。这就是取得黑箱的各种输入值 $I_1, I_2, \dots, I_m$ 。另一方面,箱子上还有许多输出接头以及其他的显示,可以借此进行观察。这就是取得黑箱的各种输出值 $O_1, O_2, \dots, O_n$ 。当电机工程师不通过拆开箱子去探测内部的元素结构,而只通过从外部影响箱子,从外部观测这个箱子的方法来研究这个箱子的行为时,就叫做使用黑箱方法。

它的图式如下:

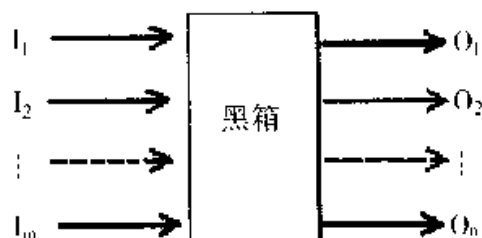


图 5.4 黑箱示意图

现在人们使用电脑就是一个很好的处理黑箱的例子。大多数人使用电脑,根本就不知道它是如何工作的,它是一个黑箱,非专业人员切勿将它打开。你可以不断地摆弄它的键盘。经一段时间的学习和摸索,你就会从输入的变化中预测到输出的变化,就可以处

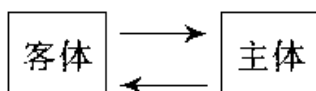
理文字、画出图表、玩游戏、接收信件、从互联网上查找资料……你便可以了解电脑的各种功能、各种行为。这就是黑箱方法的第一个作用:掌握对象系统的输入与输出的传输规律或传输规则(transformation rules)或叫做转换函数: $O = F(I)$ 。

作为科学方法论的黑箱概念虽然出现很晚(它是随控制论的出现而出现的),但人类应用黑箱方法却是很早的事情。例如,中医就是使用黑箱方法的典范。中医并不进行解剖,它甚至不问人体内部各个器官的确切位置以及它们的组织与结构,即把人体视作一个黑箱。它强调外感六淫、内伤七情等致病因素对人体的输入作用以及症状、体征、舌象、脉象等人体的输出表现,通过望、闻、切、问等外部观察来确定输入与输出及其相互关系的情况,从而在不解剖人体的情况下发现人体的生活规律和病变规律。例如肺病则喘咳、肝病见脉弦、肾虚而耳鸣、血瘀致舌紫等规律。而它的治疗方法也是在不打开人体黑箱的情况下通过药物以及其他疗法向黑箱输入适当的物质、能量和信息以“宣肺”、“疏肝”、“补肾”、“活血”等办法来调整黑箱,

使它恢复正常的状态。各种各样的药方,就是现代意义的传输规律或转换函数,找到了输入与输出的关系。再如,传统的农作物栽培学并不考虑作物的细胞结构和组织结构,它也是将农作物当做黑箱,而通过供水、施肥、田间管理、改良土壤等方法,改变对农作物的输入,以图获得大量的收获(即对人类有利的输出),这就是通过对农作物的功能性状、输出输入的研究来掌握农作物的生长规律的。

当然,系统理论认为,一个系统不仅有它的功能方面,而且有它的结构方面。如果我们既有功能方面的知识,又有结构方面的知识,就能更加全面深入地认识事物。但是,我们又不能不看到,在某个认识阶段上或者在某种程度上,将客观事物看做是个黑箱是不可避免的。因为:

第一,认识就是主体与外界对象的相互作用。对于客体来说,主体是客体的环境,而对于主体来说,客体是主体的环境,它们之间存在着如下的互为环境、互相外在的关系:



所以在认识的最初阶段,主体只能从外部影响客体并从外部观察客体。除了研究系统的行为、性状与功能之外,再没有别的办法深入到那些不表露在外的系统的内在结构中去,这时我们不得不先将客体、系统看做是一个黑箱。维纳说:“所有的科学问题都是作为‘黑箱’问题开始的,即只能辨识一些重要的变量。”“科学中有某些问题,其中一组固定的有限数目的输入变量决定一组固定的有限数目的输出变量。在这种情况下,当两组变量的有限集之间的关系为已知时,问题就是确定的了。”^①

第二,在现实生活中有许多系统,或者由于我们所研究的问题的性质,或者由于受种种条件的限制,我们没有必要或者没有可能将系统拆开,于是我们必须将它看成一个黑箱,采取功能方法来研究它。例如我们要研究奥运会上乒乓球运动员的扣球技术,我们可以用高速摄影机将比赛的场面拍成电影,并输入到计算机中分析他(她)们的动作,我们似乎没有必要也没有可能对实现这种动作的肌肉与神经进行解剖,我们只能将每个运动员看

^① N. 维纳:《模型在科学中的作用》,载丁隴元正、李建华编《系统论、控制论、信息论经典文献选编》,求实出版社1989年版,第294页。

做是一个黑箱。此外,像天体物理学家研究黑洞,地球物理学家研究地核,高能物理学家研究夸克,精神病学家研究许多精神病现象等等,都是无法将对象打开的。对于对象(无论是精神病人或是迷宫中的老鼠)头脑中所发生的事件是诊所或实验室无法直接观察到的,只能将它们看做黑箱加以研究。

第三,在对客观对象的研究过程中,我们的确能够打开许多黑箱,直接观察到它们的元素与结构。但是打开黑箱,我们又会发现它是由更多的小黑箱所组成的。这种情况不可穷尽,所以在任何时候我们都不能避免与黑箱打交道。这正如 W. R. 艾什比说的:“所有的实物实际上都是黑箱,并且我们从小到大,一辈子都在跟黑箱打交道”。^① 在某种意义上这句话告诉我们,为了认识物质系统,功能方法是不可缺少的。不过这句话也告诉我们,黑箱可以不断地被打开,不断地被观察到,而每当打开了黑箱,我们的知识就有了巨大的进步。在达尔文时代,达尔文发现了物种起源的规律,就是对物种变异的自然选择。但变异的机制是什么,对达尔文来说,是个黑箱。达尔文出游并撰写《物种起源》之时正是马歇尔·施雷顿和希奥多·施旺发现细胞之日。施旺知道细胞里面有个黑点(细胞核),估计“有关有机体原动力的答案就存在于这个细胞中”^②,可是细胞本身就是个黑箱子。打开这个黑箱之后,里面还有许多黑箱子。所以有黑箱子并不会使我们不能发现自然规律,而打开黑箱子,人们会发现更多的自然规律。

如果说黑箱方法的第一个目标是发现系统的输入输出传输规则或转换函数,那么它的第二个目标就是建构功能模型来逼近或展示出黑箱的外部行为。

科学研究中广泛使用类比方法,即根据两个对象的某些相似性(或相同性)而推出它们在其他方面的相似性(或相同性)。例如根据火星与地球的相似而推测火星上可能有生命,根据行雷闪电与实验室中火花放电的相似而推知闪电是电现象等等。当两对象之间有某种相似性时,我们称这两对象之间存在着原型——模型关系,其中一个是一个的模型。例如地球

① W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall LTD, 1957. p. 110.

② 迈克尔·J. 贝希:《达尔文的黑匣子》,邢锡范译,中央编译出版社 1998 年版,第 10 页。

是火星的模型,实验室火花放电是行雷闪电的模型,等等。模型概念异常广泛,不仅一个物质系统可以是另一个物质系统的模型,人造的实物系统(如地球仪、塑像等)可以是天然系统(如地球、人体等)的模型,而且语言、图像、符号、数学系统都可以作为模型。

功能方法或黑箱方法大大推广了模型的概念。原来以为两个对象之间只有当它们结构相似时一个才可以是另一个的模型。但功能方法指出,对于使用模型方法来说,最重要的相似性是行为与功能的相似性。两个系统之间在元素和结构上可以完全不相同,只要功能上有某种相似或相同的地方,就可以互为模型来进行研究,从而大大推广了科学研究中模型方法的应用。例如振动问题,就有一个弹簧的机械振动、空气中声波的振动,在电气系统中由电感、电容组成的电磁振荡以及数学中的微分方程:

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = y$$

(这里 y 视作这个方程的“输入”, x 看做是“输出”),它们之间在元素上是极不相同、极不相似的。弹簧的元素是些钢铁,声波振动的元素是空气,电振荡器的元素是电感、电容,其微观元素是电子,而上述微分方程的元素是数学符号。它们之间的内部相互关系(即结构)的性质又是完全不同的:弹簧的内部关系是机械力,声波振动的内部机制是分子力,电振荡器的内部关系是电磁感应,数学式中符号之间的关系是逻辑关系等等。但是它们的输入、输出和输入与输出的关系都极为相似,都表现出振荡的性状与行为,所以其中一个可以作为另一个的模型来进行研究。特别是数学模型可以被广泛地使用,模型方法在科学研究中有着极其重要的作用,它有助于发现理论和阐明理论。惠更斯将声的振动与光在功能上进行了类比,发现了它们在直线传播、反射、折射、绕射等方面的性状与功能的相似,从而以声波为模型建立了古典的光的波动说。克劳修斯和麦克斯韦等人在19世纪中叶将分子的行为与进行完全弹性碰撞的弹子球的行为做了类比,发现了它们之间的相似,于是在机械球体随机碰撞的模型的基础上建立和阐明了分子运动论。

在功能方法中,有两种不同模型,一种叫做功能同构模型,另一种叫做功能同态模型。所谓功能同构就是在两系统之间(即原型与模型之间),它们的各个输入值和输出值都是一一对应的。反之,如果原型的输入输出值

与模型的输入输出值是多一对应的,则它们称为功能同态关系。功能同态模型是大大简化了的模型,它不要求模型中每一个状态都与原型一一对应。由于同态模型的这种特点,使得它在科学研究中有更广泛的应用。功能同构和同态问题,是功能方法中的一个极为重要的问题,需要在认识论中详加研究。

黑箱方法或功能方法还有第三种作用或第三个目标,就是通过功能模型来推测系统的结构,提出有关系统结构的种种假说。在下一节有关隐喻与模型方法的介绍和讨论中,我们将会进一步讨论到这些问题。

►► 5.4 隐喻、类比与模型

隐喻、类比与模型是系统科学的基本方法之一。隐喻是日常语言和科学研究的一种通用研究方法,它的基础是类比推理,隐喻、类比的精确化就是建立模型。不过在系统运动兴起的第一阶段和第二阶段,现代隐喻理论还没有很好地建立起来,因此系统科学的一些创始人更多地谈到类比与模型,而较少谈到隐喻。例如一般系统论四位创始人之一、20世纪60年代一般系统研究会的会长 A. 拉波波特就说过:“可以把一般系统论看做是目的在于把类比推理导入理论上富有成果的发展方向的一套纲领”,“类比必然要作为一般系统论的任何一种阐述的基础”。^①可以说,系统科学主要是在生命的隐喻与类比中研究复杂系统的。控制论的创始人、数学家 N. 维纳与他的合作者、神经生理学家 A. 罗森勃吕特于1945年合写了一篇论文《模型在科学中的作用》,其中谈到:“科学知识是由一系列抽象模型所组成的”,“不完全的模型是由科学所发展的用于理解世界的惟一手段。”^②这篇论文实际上就是他们发表共同研究成果即控制论的前奏。控制论主要是在对机器和动物行为进行类比和隐喻的基础上提出来的。到了最近一二十年,隐喻问题在认识论、认知科学、科学哲学中日益突出,人们甚至将隐喻看

① A. 拉波波特:《一般系统论》(1985),钱兆华译,福建人民出版社1994年版,第23、29页。

② A. 罗森勃吕特、N. 维纳:《模型在科学中的作用》,载于庞元正、李建华编《系统论、控制论、信息论经典文献选编》,求实出版社1989年版,第296—297页。

做是人类思维的本质。于是,系统科学家们开始更多地讨论隐喻方法在系统科学中的运用。著名系统科学家福罗德(R. L. Flood)与卡尔森(E. R. Carson)在《处理复杂性——系统科学的理论与应用导论》一书中写道:“隐喻与类比,即‘类似性’思想,可以用来在难于理解的现象中获得洞察……系统隐喻能提供巨大的多样性范例来帮助我们的思考过程。”^①因此,本节的讨论从隐喻开始,逐步进入需要数学表达的模型问题。模型理论和方法的最新发展是计算机模拟,它对于系统科学的作用可被喻为“系统科学的实验室”。有关计算机模拟的性质及其运用,将在本书第7章以后进行介绍。

▷▷ 5.4.1 隐喻及其在系统科学中的应用

隐喻(Metaphor)是将一种概念领域与另一种概念领域进行暗含的比较。这种比较并不是明白说出这种现象“类似于”、“很像于”另一种现象。明白说出不同现象的类似之处叫做明喻(simile)。与明喻略有不同,隐喻更强调将一个概念领域或现象领域认同于(identify)另一个概念领域和现象领域,从而用一个领域来理解另一个领域,用熟悉的领域来理解不熟悉的领域。譬如“人生是个旅程”、“国家是个机器”、“时间就是金钱”、“电脑出现病毒”、“技术是人体器官的延长”……都是人们日常思维中的隐喻表达式。譬如,时间是一个抽象的概念,对于它在我们生活中的意义,许多人并不太了解,也不太重视。当我们用隐喻的方法对它进行理解时,会得到许多具体的洞察:时间可以白白地“浪费掉”,“丢失了”宝贵的时间,就像浪费了金钱,浪费了投资,丢失了你的宝贵财产一样;时间是可以“争取”和“赢得的”,你努力做一件事,多、快、好、省地把它做完,就为你做别的事情“赢得”了时间,就像金钱可以赢得、赚来一样。事实上,在现代的经济活动中,时间是“值”钱的。企业工人的工资是按小时计算的,打电话的付费是按分钟计算的,旅馆的住宿费是按日计算的,银行存款或借款的利息也是按时间计算的。有些企业拼命延长工人的工作时间,而有些技术人员改进技术以减少生产一个产品的单位时间,都体现了时间就是金钱的隐喻。在经济学中,时

^① R. L. Flood & E. R. Carson : *Dealing with Complexity*. Plenum Press, 1993, pp. 19-20.

间与金钱对于完成我们的工作都是一个有限的资源,因而是有价值的产品。因此“时间就是金钱”的隐喻极大地提高了你对现代社会中时间的意义的理解,并建构了你的生活时间概念。

有一个时期,人们认为隐喻只是一个修辞学的问题,即关系人们的语言怎样说得更加直观、更加形象、更加生动和更加漂亮的问题,而不做比喻和隐喻,也可以将问题说清楚,只是枯燥乏味一些罢了。但是到了20世纪最后几十年,科学哲学家、语言学家和认知心理学家发现,隐喻思维不仅是一个修辞问题,而首先是关于人们的思想与行动的问题,关系到概念的形成与建构的问题。除了人们的某些直接经验,即所谓前概念结构之外,人们的思维都与隐喻有关。M. 明斯基(Minsky)说:“所有的思想在某种程度上都是隐喻。”^①隐喻成为人们思想方式的本质的东西,正是隐喻系统建构了我们的概念系统。于是,科学哲学家们重新研究许多科学概念,发现许多科学概念都是通过隐喻与类比而形成的,并通过隐喻而获得解释。例如原子的概念、化学键的概念、蛋白质结构的折叠概念、DNA的双螺旋结构的概念、“气体是随机运动的粒子集”的概念以及“声音是借助于波动运动而传播”的概念、“电流”是某种流体在导管中流动、电压就是这种“流体”的压力的概念等。在这里,隐喻可以像G. 莱可夫(George Lakoff)那样定义为“从一个概念、领域到另一个概念、领域的映射”。后者叫做源领域(source domain),前者叫做目标领域(target domain),目标领域因映射到(mapping)源领域而得到理解,甚至其意义也由此而得以形成。例如,我们正是借助于金钱的源领域来说明刻画时间(宝贵)的目标领域,借助于完全弹性碰撞的弹子球的随机碰撞运动的源领域来形成和建构、说明和解释作为目标领域的气体运动的概念,用双螺旋空间结构的源领域来形成、解释DNA结构的概念。在这个隐喻过程中,有一种意义(meaningfulness)和特征(features)有选择地从源领域转移、传递到目标领域,就像“那旧瓶子灌注人新酒”一样。^②这就是隐喻对于科学概念意义的建构作用和解释作用。

当然,一个概念有许多特征需要说明,因此可以选择各种不同的隐喻来

① Minsky, M(1987) *Society of Mind*. New York: Simon & Schuster, p. 299. <http://alumni.media.mit.edu/~mt/thesis/mt-thesis-2.1.html>.

② Black, M. (1962): *Models and Metaphor*. Ithaca, NY: Cornell University Press, pp. 238-239.

说明。例如在系统科学和系统管理中,有一个非常重要的概念:系统的组织。家庭、社团、政府、教会、大学、特别是企业、公司和商店都是组织。不同的隐喻反映了组织的不同方面的特征,这些特征是互补的,也是相互竞争的。我们将哪一些特征置于首要地位,反映了我们对于组织的不同理解的历史演变。下面是对组织的几种不同的隐喻:

1. 组织就是机器。人们常用机器作为源领域来隐喻各种事物。例如,宇宙就是一个大机器,所有事物之间就像齿轮一样耦合起来相互运转。早期的资本主义随着大工业的发展,出现了这样的精确分工和严格配合的社会系统或社会组织。机器大工业的原则是将一个生产过程分解为各个构成要素,按各种流水线的流程以最高的效率运转起来。工人的职能以及与此相关联的劳动分工和合作就是这样跟随机器运转,他们的工作就是为达到资本家想要达到的目标,按层级地被调节和控制。20世纪初的科学管理或理性管理的创始人 F. 泰罗(Frederick Taylor)早就看到“工人在沉默中日复一日地被仅仅当做机器的一部分那样的过程”。^① 所以大工业社会组织就是机器,工人不过是机器的一个齿轮或螺丝钉。这个隐喻在卓别林的电影《摩登时代》中表现得淋漓尽致。

20世纪早期美国企业管理相当混乱,科学管理的创始人、工程师出身并曾任美国机械工程协会主席的泰罗提出了一整套管理的理念:一切为了提高工作效率,以达到工厂需要达到的目标。为此他用工程师的思考方法,分解工人的劳动动作进行测试,并重新组合以规定操作规程和工作定额,并进而规定工作计划,依此制定工资率,达到“科学”标准的雇员或“头等工人”可获得125%的工资,未达标的工人只能获得80%的工资,甚至加以解雇。由此,工厂的管理建立了一套监督系统。他的这套管理理念其隐喻就是“组织应该是一部机器”。这个隐喻突出了组织的效率与纪律,但忽视了组织成员的自主性和积极性,并且这种组织设计在瞬息万变的环境中显得过于僵硬。

2. 组织就是生命有机体或具有大脑的生命有机体。相对于将组织系

① Taylor, Frederick, W. *Shop Management*. New York: Harper & Row, 1903, pp. 184-185. 转引自丹尼尔·A. 雷恩:《管理思想的演变》,赵睿等译,中国社会科学出版社2000年版,第173页。

统隐喻为机器,复杂系统研究用生命有机体做隐喻则似乎更合适。马克思和斯宾塞一样,早就将社会组织比喻为生命有机体,他批评旧经济学家“不懂得经济规律的性质,他们把经济规律同物理学定律和化学定律相比拟……对现象所作的更深刻的分析证明,各种社会有机体像动植物有机体一样,彼此根本不同……”。^① 马克思对于机器本身也做了有机体隐喻,他早于技术哲学创始人 E. 卡普提出“技术工具是人体器官的投影(organ-projection)”说之前,就在《资本论》中写道:“劳动者直接掌握的东西,不是劳动对象,而是劳动资料……这样,自然物本身就成为他的活动的器官,他把这种器官加到他身体的器官上,不顾圣经的训诫,延长了他的自然的肢体……在劳动资料本身中,机械性的劳动资料(其总和可称为生产的骨骼系统和肌肉系统)比只是充当劳动对象的容器的劳动资料(如管、桶、篮、罐等,其总和一般可称为生产的脉管系统)更能显示一个社会生产时代的具有决定意义的特征。”^② 卡普对此做了进一步引申:“这样,大量的精神创造物突然从手、臂和牙齿中涌现出来。弯曲的手指变成了一只钩子,手的凹陷成了一只碗;人们从刀、矛、桨、铲、耙、犁和锹中看到了臂、手和手指的各种各样的姿势,很显然,它们适合于打猎,从事园艺以及耕作”并且“铁路是人体循环关系的外在化”,“电报是神经系统的延伸”。^③ 更不用说当今世界电子显微镜与射电望远镜是人的眼睛的延伸,大型起重机是人手的延长,而计算机网络是一个扩展了的和系统化的大脑神经系统。因此,用生命有机体来比喻人的社会活动包括人的技术活动,似乎有更为广泛的意义。

作为系统的社会组织是一种有机体这个隐喻包含和传递了许多意思:第一,它说明社会组织是一个复杂系统,而不是要达到某个业主或支配者的目的的一种手段(如同机器隐喻所暗含的那样),它本身的生存和生命就是目的。因此,它的各个职能部门具有维持整体生存与发展的功能。而当这个组织出现问题时就要进行组织诊断,以保证这个机体的各个部分协调发展。所以成员之间协调合作、同舟共济、调整人际关系达到和谐发展是十分重要的。组织管理学中的人际关系模型也与这个有机体隐喻密切相关。第

① 马克思:《资本论》,第1卷,人民出版社2004年1月第2版,第21页。

② 同上,第209—210页

③ 卡尔·米切姆:《技术哲学概论》,殷登祥、曹南燕等译,天津科学技术出版社1999年版,第6页。

二,它说明社会组织是一个开放系统,像有机体一样,必须与周围环境有良好的物质、能量与信息的交换,适应环境的变化,否则它就要死亡。因而随环境的变化,组织必须改进甚至转型。而当我们把组织隐喻为具有大脑的生命有机体时,就特别注意从外界以及从内部获得信息并进行加工处理,并通过主动的学习和对职工的培训以对环境做出积极反应的重要性。第三,它说明任何组织都有一个像生物有机体那样的生存竞争和进化的问题。于是企业之间的竞争被隐喻为生存竞争,企业之间或组织之间的合作被隐喻为生物共生,而企业的传统或组织的传统被隐喻为文化基因,从而揭示了上一章所说的广义进化论的规律。但组织的有机体隐喻和具有大脑的有机体隐喻的缺点是可能过分强调了组织的整体性和目标的一致性,结果会掩盖了内部的利益冲突、意见冲突和组织部门或组织成员自主性的重要性。

3. 组织是一种文化。组织是行动主体的组织,这个行动主体就是个人,他们不仅是生理人、经济人,而且是伦理人和政治人,有自己的价值观、信念和自我实现的需要,因此组织必须关注组织成员的文化氛围,关注他们的思想自由,鼓励他们的独立思考与创新,以至于协调这些价值观念,形成某种一致思想与行动方式:一种企业文化或组织文化。批评者认为这种隐喻“转移了对组织成功的重要方面的注意力,比如达到目标、设计适当结构、管理各种资源等等。这个比喻还可能导致组织对雇员的意识形态的控制”^①。

以上的三种隐喻,反映了也促成了系统管理思想发展的几个重大阶段:从机器观到有机体和大脑观,再到社会文化系统观。然而,所有这些隐喻都刻画了作为系统的组织的特征各有它的优点和局限性。杰克逊列举了理解和形成社会组织系统观点的9种隐喻,认为我们应该综合地和整体地看待它们,而不要忽略其中任何一种隐喻对启发性系统思想和系统方法的作用。这9种隐喻就是:组织即机器;组织即文化;组织即政治系统;组织即心灵监狱;组织即统治工具;组织即狂欢节,等等。对于这些隐喻的含义,我们将会在本书的第11、12章有所阐明。

^① 迈克杰·C. 杰克逊:《系统思考——适于管理者的创造性整体论》,高飞、李萌译,中国人民大学出版社2005年版,第32页。

▷▷ 5.4.2 隐喻的结构与类比思维

从5.4.1的分析可以看到:隐喻并不仅仅是一个语言的修辞问题,而是我们的概念系统的一个不可或缺的组成部分。所谓隐喻是这样一种思维方式:它是不同概念领域之间、不同学科领域之间的一种映射关系。当人们进行隐喻思维时,通常是运用比较具体的、或我们比较熟悉的、或有结构性的源领域作为比较抽象的、或我们不熟悉的、或无结构的领域的映像来建构、解释和预言后一个领域即目标领域的概念特征。因此,要理解隐喻的结构,就要理解这种跨领域的概念群的映射关系。例如,在我们做出“组织就是社会的有机体”这个隐喻时,首先做了这样一件事:将两个集合的元素对应起来。即:

组织作为社会有机体的像源,有机体作为组织的映像。

组织成员对应着生命有机体的细胞。

组织的部门对应着生命有机体的器官。

组织的决策对应着大脑皮层的活动及其输出。

组织的传统和人员的培训对应着生命有机体的遗传。

组织业务的发展和扩大对应着生命有机体的生存与发展。

.....

“组织就是社会有机体”的隐喻的第二种对应,就是推理模式从生命有机体领域向组织有机体的转移。生命有机体例如人体有生理疾病时,必须进行诊断,由此推理出治疗药方,例如用药、开刀或输血等等。对应着一个企业组织也会面临各种困难,如某些部门或某些领导人“贪污腐败了”、拖欠工人的工资等等。诊断企业的疾病,做出结论要向某些领导人开刀,撤查有问题的领导,向银行贷款“输血”,给工人补发工资,恢复正常的生产秩序和组织运作秩序等,这就是推理模式的对应。

隐喻的第三种对应是跨推理模式的潜在对应。“组织是社会有机体”这个隐喻及其对应关系或映射关系,是长期科学研究的产物,不是信口开河的结果。因此在源领域例如生命有机体的知识体系、知识结构中,到底哪一些元素或推理模式适合于作为目标领域的社会组织的映射呢?这是一个开放问题。源领域和目标领域都是一个开放类(open-ended class),例如高级动物生命有机体的中枢神经系统都有一种指导与调节作用。除非神经系统

或身体的某些部位出了毛病,身体所有器官甚至各个细胞都服从中枢神经系统的指挥。这个推理模式能不能作为任何组织的映射,而做出这样的隐喻:组织中的一切部门与成员都要服从组织的大脑的任何指令?这种映射是不合适的,这类对应只能是潜在的对应。不过也有许多潜在的跨领域对应关系的映射是完全合适的。例如那些经营不好的组织或企业必定要经受自然淘汰。这就引起一个问题,即隐喻的逻辑问题。这种逻辑是一种类比逻辑。若以 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 表示源领域 A 系统的概念元素或推理模式,以 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 表示目标领域 B 系统的概念元素或推理模式,以 $a \sim b$ 表示以 a 隐喻 b,其中符号 $\sim$ 表示一种相似性,则类比逻辑的推理格式可以粗略表示如下:

1. 源领域 A 具有 $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$
2. 目标领域 B 具有 $b_1, b_2, b_3, \dots$
3. $a_1 \sim b_1, a_2 \sim b_2, a_3 \sim b_3, \dots$
4. 所以, B 领域中很可能存在 b_4 , 使得 $a_4 \sim b_4$.

在这式中, $a_i \sim b_i$, 其中 i 的数目愈多, 则 $a_k \sim b_k$ 的概率就愈大, 这就是隐喻对应所蕴涵的类比逻辑。这个逻辑用著名英国哲学家 M. 海茜 (Mary Hesse) 的话说就是: “如果发现许多对象在某些方面的类似性大于它们的差别, 则我们有理由期望在别的方面它们的类似性也大于它们的差别”,^①

隐喻中所蕴涵的类比逻辑或类比思维, 在系统科学中得到了极为广泛的甚至可以说是全面的运用, 以至于 A. 拉波波特说, “类比必然要作为一般系统论的任何一种阐述的基础。”^② 有关这种类比的最系统的著作, 是 1978 年系统科学家 J. G. 米勒所写的《生命系统》一书。^③ 米勒首先将复杂系统, 即他所称的 (广义的) 生命系统划分为 8 个层次, 即 8 个类别: (1) 细胞; (2) 器官; (3) 生物个体; (4) 群体, 包括动物与人类的配偶、家庭, 动物与昆虫的社会, 人类的小社团; (5) 组织, 包括群体与小组织组成的组织系统, 人类组织起源于文明社会早期的灌溉工程, 现代的宗教组织、军队、企业、医院、大学以及政府机构都属于组织; (6) 社区, 包括村庄、城市、郡县等; (7) 社会, 社会的现代形式是多民族国家或单一民族国家; (8) 超国家组织, 如

① Mary Hesse (2000), “Models and Analogies”, in W. H. Newton-Smith (ed.) *A Companion to the Philosophy of Science*. Blackwell Publishers, 2000, p. 299.

② A. 拉波波特:《一般系统论》, 钱兆华译, 福建人民出版社 1993 年版, 第 29 页

③ Miller, J. G., *Living Systems*. New York: McGraw-Hill, 1978.

欧盟、独联体和联合国。这些复杂系统的层级类的划分,反映了我们在上一章所说的通过突现产生的新层级跃迁,是按照从简单到复杂排列的。这是广义生命系统或复杂系统类比矩阵的横行,对横行上的各层级系统进行广泛的类比,就产生了矩阵的纵列。这个类比可以在组成、结构、功能和进化四个方面进行。在结构方面,例如企业的劳动分工与生物个体的器官专门化十分相似;在功能上白血球对入侵细菌的战斗,与动物对入侵它们地域的其他动物的驱逐以及民族国家的反侵略战争十分相似;至于进化,则各个不同类层次系统都有一个形成、壮大和解散、消灭的历史以及以广义进化论为基础的发展。不过米勒更加注重这些不同层级系统之间在组成要素(即它们各自的分系统)上的相似。于是他列出了 7×19 的矩阵对不同复杂系统之间的分系统进行类比。这可以称得上是复杂系统之间的“比较解剖学”。我们将米勒的复杂系统的比较解剖学的表格列举如下:

表 5.4 米勒的复杂系统分系统比较表

层次 分系统	细胞	器官	生物体	群 体	组 织	社 会	超国家系统
复制器	染色体	无; 向下分散于细胞层次中	生殖器	配 偶	为组织发放许可证的群体	立宪会议	产生另一超国家系统的超国家系统
边 界	细胞膜	内脏被膜	皮 肤	武装警官	组织所有权护卫队	边境护卫队组织	超国家边境护卫队组织
摄取器	细胞膜间隙	器官的输入动脉	口 部	供应点心和饮料等的人	接纳部门	进口公司	管理国际港口的超国家系统官员
分配器	内质网	器官的血管	维管系统	向家庭成员分配食物的母亲	监工	运输公司	联合国儿童基金会
变换器	线粒体内的酶	实质细胞	上消化道	屠夫	炼油厂经营群体	炼油厂	欧洲原子能联营
生产器	线粒体内的酶	实质细胞	未 知	厨师	工厂生产单位	工厂	世界卫生组织
物能储备器	二磷酸腺苷(ATP)	胞间液	脂肪组织	贮存食物的家庭成员	贮藏室管理群体	存货公司	国际红十字会

层次 分系统	细胞	器官	生物体	群体	组织	社会	超国家系统
排放器	细胞膜间隙	器官的输出静脉	尿道	清扫妇	交货部门	出口公司	国际原子能机构废物处理部门
驱动器	微管	器官的肌肉组织	腿部肌肉	无;横向分散于共同移动的群体成员中	驱使组织全体人员移动的小部分核心人物	汽车货运公司	北约组织运输部门
支持器	微管	基质	骨骼	体力上支撑群体内其他的人	组织建筑群体管理	管理公共建筑物和国土的国家官员	管理联合国建筑物与境界的超国家官员
输入转换器	细胞膜的特殊感受器部位	感觉器官的感受器细胞	外感受器官	监视者	电话话务员群体	国际新闻服务部门	为超国家系统提供信息的新闻服务部门
内部转换器	阻遏物分子	心脏窦房结的特殊细胞	对血液状态变化作出反应的感受器细胞	向决策器报告群体状态的群体成员	检查单位	民意测验机构	超国家检查组织
信道与信息网	细胞膜	器官的神经网络	网状神经系统的组成部分	通过空气或其他成员传递信号的群体成员	民间电话交换台	国立电话网	万国邮政联盟
解码器	分子组合部位	感觉器官的感受器或次级细胞	感觉中心内部细胞	译员	外语翻译团体	语言翻译单位	超国家语言翻译单位
联想器	未知*	未知*	未知*	无;横向分散于联结群体的成员中	无;向下分散于各个人与生物体层次中	教学机关	超国家大学

层次 分系统	细胞	器官	生物体	群体	组织	社会	超国家系统
存贮器	未知*	未知*	未知*	家庭的成年人	档案室	图书馆	联合国图书馆
决策器	调节基因	窦房结的交感纤维	大脑皮质部分	户主	行政办公室	政府	欧洲共同体部长会议
编码器	激素产生部位	器官输出神经原前突触区	人的优势大脑半球的颞叶	群体声明撰写人	语言与书写部门	新闻秘书	联合国国际情报局
输出转换器	前突触膜	器官输出神经原前突触区	喉部	发言人	新闻发布室	政府发言人办公室	华约组织正式发言人

这个类比表格虽然很不完善,并且也许还有牵强附会的地方,但它明显地体现出通过隐喻和类比的方法,只要跨越系统的各个不同类型和不同层级,就可以概括出复杂系统的共同特征、共同结构和一般规律。同时,我们在第3和第4章中所讨论的系统概念和系统思想都可以在这种系统比较解剖学中找到一些具体的例证,对这些概念和原理加以说明。米勒的比较表特别说明下列几点:

1. 复杂系统就是一个等级层次系统,从细胞到联合国都是一步一步地组成越来越复杂的等级层次。

2. 复杂系统是一个开放系统自组织过程,它通过“边界”的过滤,从环境中通过“摄取器”,输入高负熵的物质与能量,而在系统内部则经过“分配器”、“变换器”、“生产器”和“存贮器”实现这些物质与能量的内部循环,保证开放系统的内部动态平衡与稳定,最后又通过“排放器”将低熵物质与能量排出系统之外。米勒的类比方法向我们具体说明了开放系统的这个物质能量的输入、穿过、自组织和输出的过程。

3. 复杂系统是一个有信息处理和自我决策、从而能适应环境的自动控制系统。在米勒的分系统中,有十个分系统都与这种信息代谢有关。首先,系统通过“输入转换器”和“编码器”,从外部环境和内部环境中输入信息;通过“信道与信息网”将它们传输到系统中的各个组分,并通过“存贮器”、“联想器”和“决策器”进行学习并处理信息。这个决策器可以是集中于单

个组元(所谓集中式控制),也可以分散到各个单元(所谓分布式控制),最后通过“编码器”和“输出转换器”到达各个“驱动器”执行器官,以对环境做出应对。

▷▷ 5.4.3 模型

并非所有的隐喻都可以称得上是模型。诗歌与神话都是隐喻,但不是模型。模型主要是在科学中使用,要经过或至少在原则上要经过实验来进行检验。其次,一组隐喻可以突出目标领域或对象的某一方面特征,也可以突出另外一些特征。例如对组织进行生命的隐喻,可以用中枢神经系统进行隐喻,突出组织的集中领导的侧面,但也可以用生命自组织的分布式控制和自主性方面来突出组织必须有充分的个人自由。这些隐喻之间是可以允许存在矛盾和不协调的。但是如果将这个隐喻组成一个模型,模型在科学中是认知的范式和理论的建构,它就要求有严格的逻辑统一性。理想分子运动论中的弹子球运动模型是如此,微观经济学中的经济人模型也是如此。再次,模型一般要求精确性和系统性,而一般的隐喻则可以是比较零散的、粗糙的和边界模糊的。因此,就模型与隐喻的关系来说,模型是运用类比逻辑对目标领域对象所做的精确的、体系化的、协调一致的隐喻系统。隐喻与模型的区别是一个程度的问题。

那么什么是模型呢?模型是实现数学上的同态(homomorphism)对应的一个系统。如果 S_2 是原型 S_1 在映成函数 h 下的同态映像(homomorphic image),则 S_2 连同 h 被称为 S_1 的模型。在这里,原型 S_1 相当于隐喻中的“目标领域”,而同态映像即模型 S_2 相当于隐喻中的“源领域”。因此我们应该首先从什么是同态系统的讨论开始,这个讨论需借助于我们本节讲到的直觉案例进行。

同态是抽象代数系统中的一种。我们首先使用数字的符号来加以表示:

请看图 5.5 两个集合(或满足一定运算规则的群)之间的关系。在系统 S_1 的集合 X 中,对于每一个元素 x_i 都在 S_2 的集合 y 中存在惟一一个元素 y_i 与之相对应,而所谓与之相对应,即是说它们之间有一个函数 h 成立,例如 $x_1 \rightarrow y_1, x_2 \rightarrow y_1, x_3 \rightarrow y_3$,等等。如果组织是 S_1 ,生命有机体是 S_2 ,则组织某一成员 x_i 对应着有机体的某一细胞 y_i ,某一组织部门 x_3 对应着生命有

机体的某一器官 y_3 等等。这里映射 $\rightarrow$ 就是一种对应关系。

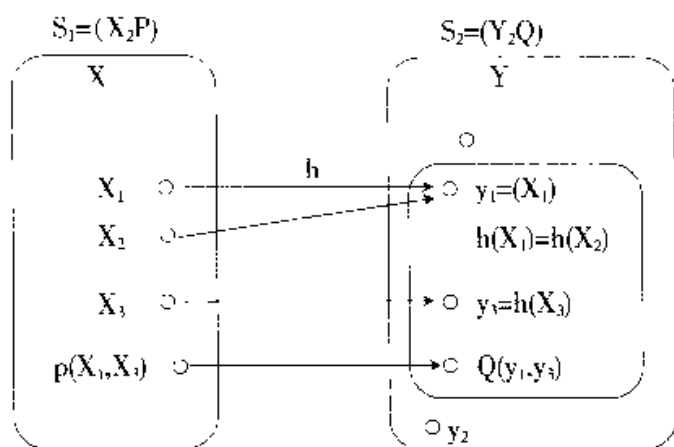


图 5.5 两个集合之间的同态对应

其次,我们要注意到这个对应可以是一一对应(如 $x_3 \rightarrow y_3$),也可以是多一对应(如 $x_1 \rightarrow y_1, x_2 \rightarrow y_1$);而 Y 中的元素(例如 y_2)就不一定有一个 x_i 与之相对应,就像生命体中的吞噬细胞不一定有一类组织成员与它相对应一样。

再次,在这图中还表明,当 X 中有某种关系 P 成立时,即 $p(x_1, x_3)$,或记作 $(x_1 p x_3)$,依 h 函数,在 Y 中其对应元素之间必有 Q 成立,即 $Q(y_1, y_3)$,或记作 $(y_1 Q y_3)$ 。就像某细胞 y_1 将其所带的病毒传染到某个器官 y_3 对应着模拟着组织某成员 x_1 的贪污腐败造成某个组织部门 x_3 陷入瘫痪一样。

这样,我们便归纳地理解同态的定义如下:

设有两个同类型代数系统 $S_1(X, P)$ 与 $S_2(Y, Q)$ 。 P 与 Q 是二元运算(或一元运算)。

若存在一个映射 $h: X \rightarrow Y$,使得:

对于任意的 $x_1, x_2 \in X$,有

$$h(p(x_1, x_2)) = Q(h(x_1), h(x_2))$$

则称 h 为从系统 S_1 到 S_2 的一个同态映射,简称为同态, S_1 常被称为同态原象(original), S_2 称为 S_1 在 h 下的同态映像(homomorphic image)。

系统的同态对应在日常生活中有许多类似的例子,例如城市的供水网是城市供电网的同态映像,地图是实地的同态映像,在中国地图中广州、韶

关、武汉、北京基本上保持在一条直线上,而实际的方位也是这样;一部电视机的线路图是这部电视机的同态映像,电视机中的实体部件,如电阻、电容、电感以及显象管等等在线图中都有表示;布尔代数的逻辑关系是开关电路的同态映像,反之亦然,等等。同态对应对于研究原系统 S_1 有几个好处:(1)它允许多一对应,即原型 S_1 中的几个不同的元素可以对应 S_2 中同一元素。广州市内有许多不同的地方,但在中国大地图中只对应同一点,即广州市标志。某大学有学生上万人,谁也不能记住一万多个名字及其相关者的特征,但在模型中他们分别对应了四个类:博士生、硕士生、本科生、大专生。这些多一对应就起到认识中的简化作用。现实世界是非常复杂的,如果我们对一个系统的所有特征都要了解,不但疲于奔命,而且绝无可能,因此必定要从实际出发,抽象出一些主要的特征,对于被认知的系统就是一个同态对应。(2)同态映像中可以有一些元素在原型中没有相应的元素,这就使同态映像可以有很大的能动性 with 创造性。如果一个理论是现实世界的同态模型,则在理论概念中,有许多概念是无实在指称的。例如数学中有虚数,电学中有位移电流,热力学中有麦克斯韦妖,经济学和社会学中有完全竞争、经济人和乌托邦这些假说,在现实生活中无对应物。(3)同态映像的条件是在原型中有某种关系 P 成立,则映像中必有某种关系 Q 在其对应元素之间成立。反之亦然(当有对应元素时)。这就使得我们可以通过研究 Q 来揭示 P 的性质、关系、规律和效果,预言世界未来将有什么事态出现,以便做好准备进行应变。

看来,所有的科学预言和技术预言,都带有这种同态对应的性质。例如,牛顿力学和万有引力定律预言了潮汐的涨落,彗星的出没,天文学家因此而预言行星、彗星运行的位置,航天专家因此而预言人造卫星、飞行器的方位。爱因斯坦的广义相对论预言星光经过太阳的强大引力场附近的弯曲,哈耶克预言了指令性计划经济行不通,苏联的生存时间大约只能有 70 年,马寅初预言中国人口不加控制的严重后果等等。

对模型可以有不同的分类,过去常将模型划分为两类,一类是抽象的形式模型,如各种数学模型,另一类是实体模型,如船模、航空模型。但由于模型理论的发展,特别是计算机模拟解决实际问题的能力得到极大地提高,因此现代系统科学一般将模型分为四类,是按照原型与模型是属于纯数学的抽象系统还是属于非纯数学的已诠释过的系统作标准来划分的。这里所谓

“已被诠释过的”(interpreted),通常是指比较具体的或者实体性的系统。这样系统模型分为下列四类:

	原型系统	模型系统
I	已诠释的	数学的
II	数学的	已诠释的
III	已诠释的	已诠释的
IV	数学的	数学的

第一类系统模型包括解决各种具体问题的所有数学模型。它以已被接受的自然规律和社会规律为基础。它解决一个具体问题,不是依靠对这具体问题进行观察与实验,而是将这个具体问题转换为数学问题,通过数学推理来得出答案。例如一个电路系统的电流电压的变化可以不通过实际测量来得到,而是依据电磁学规律建立微分方程的数学模型、将一些已知数据代进去求解而得到。在人工制品生产过程中,只要有合适的数学模型,就可以在产品制造出来以前解决许多问题。例如生产一颗原子弹,使它爆炸到底需要多少公斤的铀 235,这个问题可以在生产原子弹之前通过数学模型将它计算出来。1945 年 8 月美国在广岛投下了第一颗原子弹,早在 1942 年就通过运用物理规律建立数学模型计得铀 235 的所谓核链式反应的“临界质量”为 15 公斤。

第二类系统模型就是用具体的模型来解决数学问题。最典型的例子就是用各种计算机来解决数学问题。每一个这样的计算机系统都设计成某类数学系统的普遍模型。例如要进行加法运算有加法器,要解线性微分子方程有线性分析器,要解多项式函数有多项式分析器。要计算 π ,用电脑来计算,不到一秒钟的时间,就比中世纪数学家几代人的努力而算得的结果准确得多。此外,计算尺以及运用电子线路装置来解决全部命题演算的逻辑函数问题,都是运用物理实体模型来解决数学问题的很形象的实例。

第三类系统模型就是运用某种已诠释的系统来做另一种已诠释的原型系统的模型。这在工程学上有很多的应用。例如化学公司要试验洗发剂和化妆品的毒性,不能将其浓缩液用人的眼睛做实验,就以兔子做人的模型进行“滴盲”实验,就可知道这些洗发剂的浓度达到多少,便可以使人眼睛失明。又如训练飞行员过程中用飞行模拟器代替真实飞行。人工心脏,人工肾脏,都是人体真实的心脏和真实的肾脏的模型。此外,地图、地球仪、自

然博物馆中石器时代的村庄、DNA 分子的双螺旋模型,作为人脑模拟的电脑等,都属于第三类模型。

第四类模型是用数学系统来模拟数学系统的模型。这在应用数学中极为重要。例如要解二阶常系数线性微分方程,就可用到以代数方程为模型求解。这就是将它代换为特征方程,在用特征代数方程求解后再代回原来的微分方程。又如拉普拉斯变换和付立叶变换,就是以计算级数的系列为模型来解比较复杂的微分方程问题。此外,解析几何是第四类模型的最好例子。它以几何为模型来说明、诠释或论证解析方程。例如在这里,一次代数方程对应着笛卡儿坐标的一条直线,二次代数方程对应着一条曲线, $x^2 + y^2 = R^2$ 的方程对应着以坐标原点为圆心,以 R 为半径的圆形, $y = f(x)$ 对应着平面上的一条曲线, $f'(x)$ 对应着曲线 $y = f(x)$ 上的一条直线的斜率,定积分 $\int_a^b f(x) dx$ 对应着曲线投影到 x 轴在 $(a, 0)$ 与 $(b, 0)$ 二点之间所围成的面积等等。

模型的研究十分重要。科学知识是由一系列模型所组成的,科学概念的意义主要是通过模型而获得的。科学推理的主要形式是模型——类比推理,科学的主要研究方法是建模,通过建模和模型分析来进行解释与预言。科学理论与现实世界之间的关系问题即所谓实在论还是反实在论问题,实质上也是一个模型问题。在系统科学中模型问题尤为重要,因为系统的一般规律和一般特征、复杂系统的一般规律和一般特征主要是通过模型、特别是计算机模拟来解决的,而任何适应性复杂系统,从原始细胞到人类社会,都有一个如何建立关于世界环境的模型以适当地对环境的变化做出反应的问题。所以研究复杂系统的主要方法是模型方法,复杂系统本身又有一个模型问题。关于认识怎样从问题的经验洞察开始,通过隐喻和类比进路,经同态和同构的科学抽象,再达到科学模型的建构和检验的系统过程,可参见本书 11.2.1 的活系统研究方法论。

第三编 复杂系统总论

第 6 章

系统复杂性

复杂性是系统科学研究的核心。前面几章讨论的问题虽然是在一般系统论的框架下进行的,但其主要内容却与复杂系统的思想和复杂系统的方法问题密切相关,本编的两章主要讨论复杂系统的总体理论,即系统复杂性问题与复杂系统动力学问题。在第四编中我们将要讨论的是当代复杂系统研究中的几个主要理论,特别是复杂系统的多层级的控制理论、自组织理论和复杂适应系统理论,它们分别与三种主要类型的复杂系统相对应,所以属于复杂系统的分论。本章的任务是在具体讨论复杂系统之前,进行概念性的清理和概念性的准备,研究什么是复杂性,我们应该用什么观点来看待复杂性;复杂性、复杂现象或复杂系统有哪些基本的特征;怎样对复杂性进行描述与度量;计算复杂性的可能性及其极限;复杂性怎样从最简单的现象或元胞中构造出来,并怎样随着系统的进化而增长;环境复杂性、结构复杂性及功能复杂性的增长及其相互关系。

►► 6.1 复杂性的概念

在系统科学中,复杂性的概念与系统的概念同样重要又密切相关。和系统的概念一样,不同的学派对复杂性的概念有许多不同的观点,但他们有一点是共同的,就是都力图从不同的侧面、角度使自己的概念与直觉上的复杂性概念相符合,并尽可能精确地解释这些直觉上的复杂性概念。因此,讨论这个问题最好从常识的概念开始。复杂性在拉丁文 *complexus* 中,是“纠缠着”、“缠绕在一起”(entwined, twisted together)的意思。类似地,在《韦伯国际大辞典》第三版中,对复杂性是这样定义的:

1. “具有许多不相同的相互关联的部分、样式和元素,从而难以完全理解”。

2. “以许多部分、方面、细节、概念相互牵连为标志,从而必须认真研究或考察才能理解与处理。”^①

这个复杂性常识概念第1点说的是系统元素的复杂性,第2点说的是系统元素之间相互关系的复杂性,而第1、2两点都共同讲到对问题的理解上的复杂性。这个常识概念的特征启发我们,像在第3章中我们研究系统的概念一样,应该首先从四个维度或两对维度上来研究复杂性或复杂性系统,即:(1)从人与事物这对维度来研究复杂性;(2)从系统的元素以及元素之间相互关系这对维度上来研究复杂性。从第一对维度上来研究复杂性,复杂性首先与“物”的维度,即我们研究的对象相关。对于我们所要研究对象的复杂性,常识定义对这个研究对象没有做出什么限定,它们可以是自然系统也可以是人工系统,可以是物质系统也可以是观念系统等等。至于从人的维度上看,复杂性与人的认识能力、与人们“理解它们和处理它们的方式”密切相关。凡是难以分析、难以综合、难以计算、难以研究与处理、难以建模、难以预测的系统就是复杂系统,否则就是简单系统。而这种难易程度又以我们从什么角度、用什么方式来处理它们有关。一只黄鼠狼的生理结构与行为从动物学家、动物生理学家、心理学家或病理学家的角度来分析它,是一个很复杂的系统,至于它是不是SARS病源,它为什么以及怎样成为SARS病源直到现在还是一个不解之谜。但对于野生动物餐馆的厨师来说,这只动物对于他的处理方式来说是很简单的东西,剥皮、切开、洗净、把它分割为若干的部分加以烹煮便是了。这便是复杂性的人的方面和物的方面,“客观的”方面和“主观的”方面。关于这个问题,我们在本章第3节中还要进行详细的研究。

从事物或对象的方面来看,正像系统可以分析为元素与元素之间的关系一样,复杂性可以从元素方面进行分析也可以从关系方面进行分析。

1. 系统中需要识别的元素的种类越多,其数量越大,系统就越复杂。如果只从经典力学的观点来研究二体运动,例如简化了的地球围绕太阳的

^① 转引自 G. J. Klir (2001), *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, p. 135.

运动,需要区别的是两个质心,地球与太阳的相互运动系统,自然就比较简单,而如果用同一观点同一理论来研究大量分子,在标准状态下每立方厘米的气体分子有 2.705×10^{19} 个,要识别它们并分别进行研究就相当复杂,以至于我们不能精确地研究它们的相互作用,不能“完全理解”它们,而只能用统计力学的方法进行研究,求个统计平均;即使这样,即将这些分子大体上看做同质的,也比研究二体运动的力学复杂得多。而如果我们研究的不是同质分子,即不把它们看做同质分子进行研究,例如在生命有机体中有着几百种乃至几千种不同的大分子需要识别。这样一个系统自然就比热分子系统复杂得多。所以系统中元素的数量及其多样性是复杂性的第一个基本的客观标准。因为,在其他情况不变的情况下,系统有较多的部分需要区分,有较多的种类需要识别,有较多的数量需要计算,就有较多的认识模型需要建立,因而就要求有较多的时间,需要进行较多的计算,这样的系统就有较大的复杂性。

2. 系统元素之间的相互关系越紧密,相互联系的范围越广泛,系统就越复杂。元素之间的关系越紧密,就意味着它们的特征相互约束、相互依赖和相互规定越强烈,要了解其中之一,必定需要了解相关的其他,要了解整体依赖于我们对部分的分析,而要了解部分又需要对整体进行了解。所谓牵一发足以动全身就是这个意思。这时系统的元素或模块很难运用分析和分解的方法加以分离而不破坏其系统整体本身,而不对其组成部分进行过细的分析又很难深入理解整体。这样无论理解整体还是理解部分都更为困难,建模工作更难展开,预测系统的性状和控制系统的行为使更加困难。这就呈现出一种较为错综复杂的局面。一个医生遇到一个病人膏肓的病人,要进行治疗处理,就比遇到一个身强力壮而患了普通感冒的年轻人复杂得多,因为前者不仅需要很多医治手段,而且容易碰上左右为难的许多紧密相联的问题。

系统的元素复杂性和关系复杂性之间,有着一种重要的关系,这就是随着元素数量成算术级数增加,元素之间的可能关系所决定的状态成几何级数增加,在图 6.1 中,圆点(·)表示一个元素,线(——)表示关系,(e)表示元素的数量,(r)表示关系的数量,(s)表示有 n 个元素的系统的不同状态的数量。如果每个元素有两个状态,则系统的不同状态有 2^n 个,如果每个元素有 R 个状态,则 n 个元素的系统的不同状态有 R^n 个。R. 福罗特将系

统的可能状态数看做是系统复杂性的一种度量,不过更加严格的复杂性度量概念,要在本章第3节中才能给出^①。但是从图6.1中我们已经可以看出,随着系统元素的增加,系统的关系复杂性加速地增长。

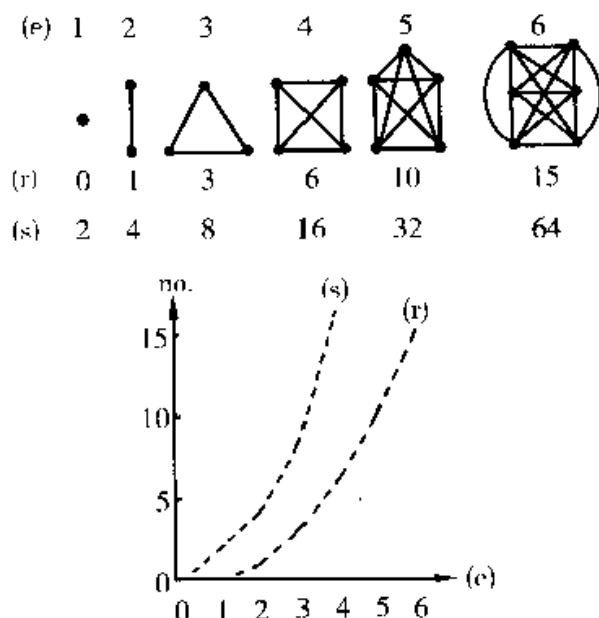


图 6.1 系统元素、可能的关系以及作为复杂性的一种度量的状态数

如果用上面的圆点(·)表示一个国家,那么国际关系的复杂性便可见一斑了。

►► 6.2 复杂性的基本特征

如果说系统科学家们对于复杂性的概念有许多种不同的定义,则对复杂性的基本特征就有更多的不同说法,而且有时将复杂性、复杂性现象、复杂系统这些词混同使用,这样就有更多不同的说法。例如保罗·杰里尔斯(Paul Cilliers)于1998年在他的名著《复杂性与后现代——理解复杂系统》一书中,对复杂系统就列举了包括大量的元素、动态的和多样的相互作用、非线性、开放系统、远离平衡态等十大特征;Wikipedia大百科全书将复杂系

^① R. L. Flood & E. R. Carson: *Dealing with Complexity - An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Press, 1993, p. 34.

统概括为具有九大特征的系统^①；而诺贝尔奖获得者 H. A. 西蒙则指出，自然界或人工设计复杂系统有内稳态(Homeostasis)，有与环境相分离的膜、有内部的专门化和近似可分解性(即等级结构等)四项“基本原则”即四项“特征性质”^②。我们认为，复杂系统的基本特征和复杂性的基本特征应该是有区别的。前者讲的是系统的起源、结构、功能的性质，着重从整体与组成元素的相互关系来研究这些系统；后者讲的是某种相互关系的性质，并着重从信息、描述和计算的角度来研究这些关系。本书第4章《系统思想》中所列举的突现与层次、通讯与控制、自组织与适应性的进化都应该看做复杂系统的特征。关于这些特征在后面各章中还要进行详细的论证。本节只对系统的复杂性特征进行分析。综合各家意见，我们认为最好将复杂性的基本特征或基本内涵归纳为下列四点，并在下一节中用信息论和可计算理论来讨论这些特征。复杂性的基本特征是：

1. 有相当数量和多样的元素以及元素之间有相当紧密的相互联系，即元素与其相互联系的多样性。
2. 这些联系是非线性的。
3. 这些联系是非对称性的。
4. 这些联系处于有序与混沌之间。

关于第1点在上节中已经做了论述。本节只补充某些实例，而着重分析复杂性的非线性特征和非对称性特征。

上节讲到系统复杂性的一种表现就是元素之间的关系随元素数量的增长而加速增长。举一个宏观经济学的实例——一个国家的某年度(t)生产总值(y_t)，它就是我们常说的 GNP，即国民生产总值。从它的最终产品构成来看，如果略去净出口额不计，是由下列三个主要部分组成的：

1. 个人在商品和劳务上的消费开支(C_t)；

① 国际维基大百科全书“Complex Systems”条目中，指出复杂系统的9大特征是：突现、短程相关、非线性关系，包含多种反馈环、开放性、部分不包含整体的全部信息、有自己的历史、层次的雀巢结构、边界难以确定。 <http://en.wikipedia.org/wiki/Complex-system>.

② Herbert Simon, “Can There be a Science of Complex System?” In Yanner Bar-Yani (ed.) *Unifying Themes in Complex Systems*. New England Complex Systems Institute. Peruses Books, 2000, pp. 3-14.

的相互关系。它等于一定关系上的矩阵自身的乘积的结果,即 $(A)^2 = (\sum a_{ik}a_{kj})_{5 \times 5} = 14$,而 $(A)^5 = 76$, $(A)^{10} = 1432$,如表 6.1 所示。这里表明,随生产周期的一年一年的增加,这五个变量之间的直接间接的关系加速增长,它们包含了某种与时间有关的幂指数关系。

再来看看布尔矩阵 B,它们与矩阵 A 的不同,只是增加了一个人口因素,即人口增长对个人消费、私人总投资和政府总开支的影响,则不但随时间的向前推进,系统的相互关系倍增,而且没有忽略掉人口因素影响的矩阵 B,从第五周期起,系统的关系数量近似地等于矩阵 A 中的关系总数的一倍。

		输入				
		y	C	I	G	N
输出	y	0	1	1	1	0
	C	1	0	0	0	1
	I	0	1	1	0	1
	G	1	0	0	0	1
	N	0	0	0	0	1

} 布尔矩阵 B

表 6.1 矩阵 A 和矩阵 B 的相互关系数目

时间周期	累积相互作用总数	
	A	B
1	8	11
2	14	22
5	76	143
10	1432	2770

这个案例说明,复杂性的第一个特征就是系统有着较多的元素(这里是 5 个基本变量和一个支持变量即时间)和较多的相互关系,这里开始时有 8 种关系(矩阵 A)或 11 种关系(矩阵 B),而随着相互作用的元素增加(矩阵 B 比矩阵 A 多了一个作用着的人口因素)和时间的推移,关系加速增长。^①

① 本案例引自 R. L. Flood & E. R. Carson, *Dealing with Complexity-An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Press, 1993, pp. 26-28.

复杂性的第二个特征就是包含非线性的相互关系和相互作用。在以上的国民生产简化系统中,从公式(6.1)——(6.5)都是简化了的线性方程,即采取了 $y = ax + b$ 的形式,但从这些变量对时间的关系来说,则是非线性的,包含了矩阵 A 或 B 对时间的幂指数关系,即 $A, (A)^2, (A)^3, (A)^4, \dots (A)^n$ 等等。经济生活有许多非线性的现象,投资与获利之间很少有线性的关系。美国股票市场在1987年10月的某个星期——一天中猛跌了五百多个百分点,20世纪30年代经济大萧条期间某一天内股票就暴跌了30%。至于个人的收益,可以在几天之内就成了暴发户,也可以在一夜之间倾家荡产。这就是一些所谓小原因导致大结果的非线性的表现。

复杂性的第三个特征就是非对称性或对称性破缺的出现。一个系统或一种关系的对称性越大,它本身的结构以及对它研究与处理就越是简单,否则它就越复杂。

所谓对称性指的是对于某组变换来说,它的型构或图式的不变性。对于对称性的系统或关系来说,只需要这些型构或图式(简称为型式)的一部分,就可以重构这个整体。如果某人的脸孔是完全镜像对称或左右对称的,则只需半边脸就足以重构他的一张完整的脸。对称群越大,重构整体所需要的型式就越少。晶体是典型的在平移或转动的离散变换群中的不变性。它是如此地有规则,以至于只要分子聚集的一点点的“种子”就足以确定巨大“冰山”的所有分子的位置。欧氏空间有最大的对称性,它是各向同性的,它在任何可能的变换中都是不变的,而无论怎样小的部分,都足以确定其余的空间性状。当然这只是欧几里得几何空间模型中的性质,当空间中存在引力场以及不均匀的物质分布时,这种对称性发生破缺,就要请出爱因斯坦来解决这个复杂的问题了。

应该指出,最大的无序性也是完全可以用对称性来刻画的。我们来看理想分子运动状态,它在概率上是完全同质的和对称的,所有的位置存在着理想分子的概率是完全同样的,并且所有同样大的体积都包括有同样多的分子数。而布朗运动是假定分子在任何一个方向运动的概率是完全一样的。

这样复杂性便具有这样的特征,它就是非对称性或对称性的破缺。在这里复杂性表现为它的任何的一个部分与方面都不能提供充分的信息来实际地或统计地预言其他部分的性质,因而使复杂性成为难以认识、难于预言和难于建模的东西。我们试想一个受精卵细胞的分裂,它由2个,4个,16个,

256 个……这样的顺序分裂下去,形成一个新的生命体,但只是在胚胎发育过程早期的很短的阶段里(在人的胚胎发育过程中,大概是在受精怀孕后一个星期左右),这种分裂是对称的,很快它便形成组织器官并分化生长(differential growth)。分化生长或特化生长(specialization growth)就是非对称性的一种形式,从而也是复杂化的一种形式。否则胚胎发育便只是成为一个巨大的细胞球(或者也许是某种葡萄胎),而理解一个很大的细胞球和理解一个很小的细胞球几乎没有什么差别,因为前者并不比后者更加复杂。因此,当导致系统结构、组织或功能的不对称性出现和不对称性增长时,我们遇到了不能归结为元素的数量与关系的增长,以及这些关系的线性或非线性网络的复杂性的第三个特征。这个复杂性第三特征,相当于西蒙复杂系统第三原则“内部专门化”和 Wikipedia 复杂系统第六特征“部分不包含整体的全部信息”。这就是说,非全息性是复杂性的一个特征。

复杂性的第四个特征就是它产生于有序与无序、或有序与混沌之间。如果系统是完全无序的(即只能通过大数定律来描述),或者系统是完全有序的(即完全可以用传统的机械决定论来描述),都没有真正的复杂性,或者说其复杂性是很低的。关于这个特征,我们将在本章第 5 节中进行较详细讨论。在这里,为了先有一个直觉的了解,让我们依据 B. 爱德蒙特斯(Bruce Edmonds)绘出下列的图形:

图 6.2(a)表示完全的有序图,图 6.2(c)表示完全无序的图。复杂性是介于两者之间,即介于有序与无序、秩序与混沌之间,或如米歇尔·沃尔德罗普(M. Waldrop)所说:“复杂性诞生于秩序与混沌的边缘”^①。但是这种认识显然与我们的视野与知觉相关,如爱德蒙特斯所说,是经过知觉的“过滤”而得到的。当我们滤丢了一些东西后,将图 6.2(c)看做是不存在规则性的东西。也许在图 6.2(c)中,有一些复杂性的东西,我们没有认识到。这样看来,从另一个视角去看,从另一个层级去看,复杂图 6.2(b)应该可能包含了完全有序的东西,而混沌图 6.2(c)应该可能包含了完全复杂性的东西。^② 这是从另一种角度上来看,复杂性介乎有序(a)与无序(c)之间,同

① 米歇尔·沃尔德罗普:《复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学》,陈玲译,生活、读书、新知三联书店 1998 年版,封面与第 5 页

② Bruce Edmonds, “What Is Complexity?” F. Heylighen et al. (ed.) *The Evolution of Complexity*. Brussels Free University, 2000, pp. 1-16.

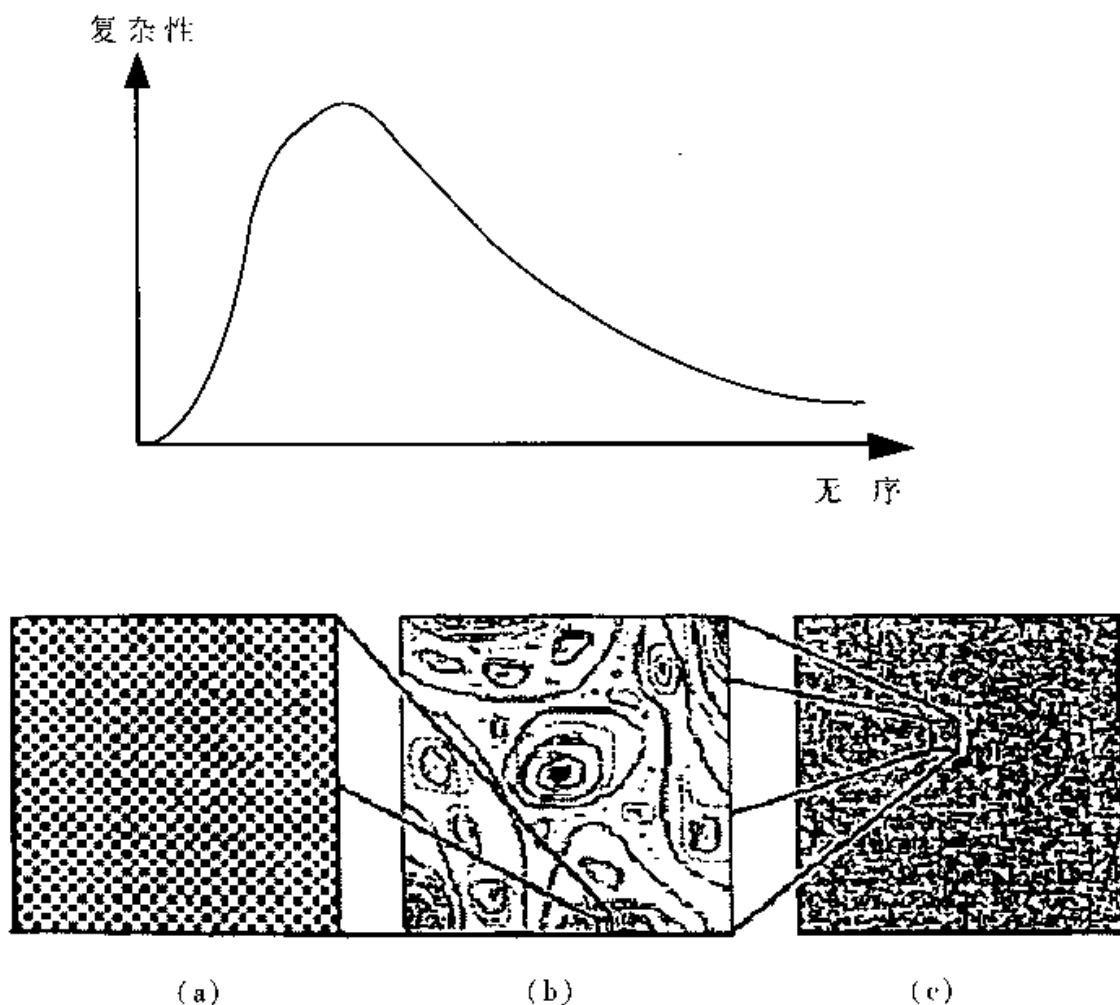


图 6.2 有序、无序与复杂性的包含关系

时,图 6.2 还说明,在讨论复杂性时,还必须研究观察者与事物之间的关系。在某一个表现层次上是有序的东西,在另一个层次上看可能是无序的东西,而在某一层次上看是复杂的东西,在另一个层次上看可能是简单的东西。大旱之年,在一片干裂了的土地上,宏观地远看上去,土地龟裂得整齐而有规则,似是简单整齐的东西;可是走近放大来看,它的裂口参差不齐,地面上高低不平,是很复杂的东西;如果再放大一点看,那高低不平的平面有些位置的泥土又是很平滑而同质的。但是如果我们的尺度再行缩小,拿个显微镜来加以观察,你又会看到非常复杂的情景。这里我们再次看到,复杂性是与测量观察的尺度相关的,并与观察者的主体认识相关联着。这就是我们在本章第 1 节中提到的研究系统、复杂性的第二对维度,即人与物的维度。

关于复杂性与观察测量者密切相关的问题,关于复杂性是相对于特定

观察者而言的、并不存在绝对的内在复杂性及其度量问题,早在 20 世纪 60 年代艾什比就有了非常明确的论述。他说:“复杂性这个词用于系统有许多可能的意义。虽然所有人都会同意大脑是复杂的而自行车则是简单的,但砍下一只羊脑袋却比精细研究自行车简单得多。所以我采取描述系统所要求的信息量来作为复杂性的度量。砍下一只羊脑袋并只区分出 30 种不同肉块的羊肉出售者,他的羊脑的信息量只有 $\log_2 30$, 即约等于 5 个比特,而自行车的精细研究者关于自行车的信息量却比 5 个比特大得多。这样来看,复杂性的度量虽然并非没有可挑剔的地方,但却是惟一的测量复杂性的可操作的方式。”^①受此引导,我们讨论下一节复杂性的度量问题,就是从信息和可计算理论的角度来讨论复杂性问题。

6.3 复杂性的度量:描述的复杂性和计算复杂性

6.3.1 描述的复杂性

一般地说,复杂性的度量问题是要解决系统复杂性的判定问题和不同系统之间复杂性的比较问题。所谓判定问题,就是要判定一个系统,从某种意义上来说,是复杂系统还是简单系统。所谓比较问题,就是以一定的计量标准来比较不同的系统哪一个更加复杂或比较简单。这里我们要指出,以下我们讨论的复杂性问题都是相对的,不是在绝对意义上来讨论复杂性。

在上节中,我们谈到艾什比主张“用描述系统所要求的信息量来度量系统的复杂性”。这就是所谓系统的描述复杂性(descriptive complexity)问题。要讨论这个问题,我们必须在讨论的语境上就以下几点取得共识:(1)描述系统所要达到的“粗粒化”(coarse graining)程度,即关于这种系统复杂性讨论要详细到哪一个层次。系统是有不同层次的。层次下面有层次,研究系统的复杂性必须有个起点。例如研究生态系统的起点就是动植物的物种,那些微生物、病毒就不在考虑之内。社会学家研究社会就以个人为起点,不考虑个人的器官、组织与细胞的复杂性。盖尔曼说:“定义复杂性时,

^① W. R. Ashby, “Some Peculiarity of Complex Systems”, *Cybernetic Medicine* 9(2), 1973, pp. 1-6. 据说这是艾什比写的最后的论文之一

有必要指出对系统的描述达到什么样的精细度,而更小的细节可以忽略,物理学家称这为粗粒化。”^①(2)我们有关的对世界的背景知识和理解的假定,例如要解释一个微分方程的解的复杂性,必须假定大家对微积分的概念已有了共识,不然要描述一个微分方程就得从小学有加、减、乘、除开始,这当然要比向大学生描述它复杂得多。(3)我们按什么语言作标准进行描述。这样,所谓描述复杂性,按盖尔曼的理解,就是“按预先约定的语言、知识及理解,描述一个已知粗粒化程度的系统所需要的最短的消息长度”。这样,如“描述复杂性”一词,英文原名为 descriptive complexity,是从句法的意义上来计算消息长度。一种最简单的方法就是用系统中所包含的实体(变量、状态、组成)数目和实体间关系的多样性来测定。实际上,在其他条件相同的情况下,任何元素实体的数目与关系的差异性和多样性的增加,导致复杂性也就增加。

当然,还会有其他测量描述复杂性的方法,不过每一种方法都必须满足下列的一般要求:

1. 复杂性必须用正的实数来表示。
2. 如果系统 A 是系统 B 的强同态映像,则 A 的复杂性不能大于 B 的复杂性。
3. 如果系统 A 与系统 B 是同构的,则它们的复杂性相等。
4. 如果系统 C 由两个子系统 A 与 B 组成,而这两个子系统并没有相互作用,并且其中一个也并不是另一个的同态映像,则 C 的复杂性等于 A 的复杂性和 B 的复杂性的总和。不过,上述要求必须在一定的语境假说下,即达到了上述三点语境共识下,才能得到满足。

但是,这里所说的“最短的消息的长度”还是不够精确的,于是有人想起要用前面讲过的申农的信息量来表达消息的长度,并用标准的计算机的计算程序来表示这个信息量(算法信息量)。于是我们便得出描述一个系统的算法复杂性(algorithmic complexity)的概念:“在一个标准通用的计算机上模拟我们约定的标准语言,来描述这个系统所需的最短程序的长度。”

^① 盖尔曼:《夸克与美洲豹》,杨建邺等译,湖南科技出版社 2001 年版,第 29—30 页。后面有关盖尔曼谈复杂性度量的论述,均出自本书以及他的网上论文: M. Gell-Mann, “What is Complexity?” <http://www.santafe.edu/~mgm/complexity.html>.

不过要这样来讨论系统复杂性的度量,除了达成上述三点共识之外,还要增加两点共识:(1)将标准语言长度转换为计算机程序长度或算法信息量的编码方法被约定为是标准的。(2)所使用的计算机经约定也是标准的、通用的。这就产生了一个我们在6.3.2中立即要进行讨论的何谓计算机程序以及程序长度的问题。

经过上述约定之后,我们便可以确定例如在生理结构上一个人的复杂性比一条毛虫的复杂性大还是小的问题。很自然,对于某种约定的标准来说,一个人的生理结构要比一条毛虫的生理结构更复杂,一个成年人所掌握的知识结构要比他在童年时代所掌握的知识结构复杂得多。这样看来,系统的复杂性有它的主观的一面,也有它的客观的一面。我们所约定的讨论语境和讨论标准是主观的,但是在相同的约定标准之下,一个系统比另一个系统复杂,又反映了系统复杂性度量的客观的一面。

▷▷ 6.3.2 算法复杂性与图灵机

上面所说的描述复杂性和算法复杂性中,有一个问题就是什么叫做“程序”,可不可能有这个“程序”。1928年,大数学家希尔伯特(Hilbert)提出了一个所谓可判定性问题(Entscheidungs problem):是否存在一个这样的程序,可按照它用有限步骤来决定给定的一阶逻辑陈述的有效性呢?为判定一个问题或一个函数是否是可计算的,即是否可用有限个步骤来解决,1936年图灵(A. M. Turing)提出了著名的图灵机判据或叫图灵定义:“如果一个函数能用图灵机来计算,则这个函数是可计算的。”也就是说,描述与计算这个函数的程序是存在的。

图灵机是一个很简单的机器,不过实验证明,当今世界所有的可能的计算机都逃不出它的范围。图灵机是怎样组成的呢?一个图灵机处理的是一条无限长的纸带(这就是图灵机的外部环境),在纸带上沿长度方向标划出大小相等的方格。每一个格可以写上从有限个字母中选出



图灵(A. M. Turing 1912—1954)

的一个符号,而不填写符号的为空格,但在纸带上只能有有限个非空的符号。图灵机的另一端是一个控制单元,控制单元有存储器使它能够任何时间处于有限的内部状态集中的一个状态。控制单元和纸带之间的交流由一个读写头提供,读写头置于纸带的一个格上,当纸带移动时读写头不动,这样它可以读取纸带上的符号并改写这个符号。

图灵机的结构,可用下图表示:

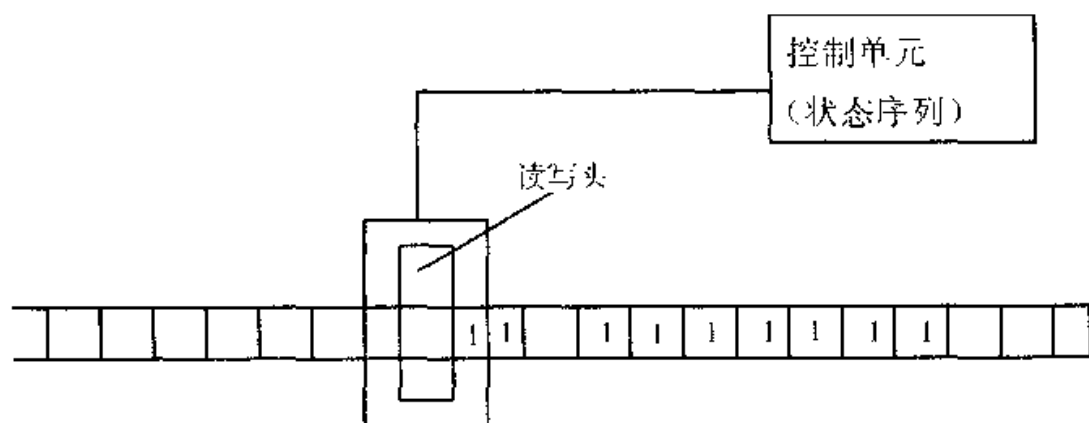


图 6.3 图灵机的结构

图灵机的控制单元以离散步骤操作。每一步将控制单元的现时状态转入新状态,然后按新状态将读写头读到的现时符号改写成新符号;然后左移或右移一格,这时从上一格的新状态转入这一格的现时状态,再按指令转入新状态;重复上述动作,直至指令用完,状态结束,则停机。

以一个最简单的例子来说明图灵机的操作:假定我们的任务系统是要将图 6.3 所示的 11 与 1111111“连接”起来。

第 1 步:将读写头右移一格(即纸带左边一格),这时读写头转入一个新状态,将读到的 1 仍写成 1,结果纸带上仍是 11 111111,转入:

第 2 步:仍和第 1 步一样动作。转入:

第 3 步:读写头读到空格,这是现时符号,但控制单元转入一个新状态,要求将空格符号改写为符号 1,这时纸带上出现 1111111111,即 10 个连起来的 1。

第 4 步——第 10 步:读写头继续右移,程序的要求都是将 1 改成 1,即符号不动。

第 11 步:程序要求将读到的 1 改写为空格符号。

第12步:读写头相对向左移,读到的那格符号不变,仍写1。

第13步——第21步:与第12步的做法相同。

第22步:将读写头向左再移一格停机,计算结果为9个1连在一起,即111111111。任务完成。

粗略地说,一个问题的复杂性有多大,就是将这个问题形式化之后,放到图灵机上计算看解决这个问题要多少步骤。一个系统的复杂性就是描述这个系统的最短的约定语言用图灵机来计量看它需要多少步。

▷▷ 6.3.3 多项式时间算法复杂性和非多项式时间算法复杂性

可计算理论只问一个系统问题是否原则上可解决,不问解决问题所要求的资源是什么,即这个问题是否事实上能解决。后面一个问题才是计算复杂性的根本问题。要解决一个问题,至少有二种资源需要研究:(1)计算时间,它指的是解决一个特殊问题(instance of problem)的程序需要多少步骤。(2)计算空间,它指的是解决一个特殊问题的程序需要多少记忆容量或存储器的数量。前者叫做时间复杂性问题,后者叫做空间复杂性问题。由于计算时间常常是决定实际地解决一个问题复杂性程度的标志,因此这里集中讨论时间复杂性问题。

用最有效的算法解决一个问题所需的程序(用比特数来表示),需要输入计算机来处理,这个数量叫做问题的大小(size of the problem)或输入长度(inputs of length);为完成这个程序需要多少步骤,叫做时间算法复杂性的大小。这个时间算法复杂性通常需要用某个函数来表示,这个表达式称为时间算法复杂性函数。例如,若有 n 比特长的程序需要 n^2 的步骤来解决,则称该问题的时间算法复杂性函数为 $f(n) = n^2$ 记作 $O(n^2)$ 。现在我们来进一步说明这个问题。

现在假定算法要解决的问题大小为 n ,需要的操作步骤为 $f(n) = 7n^3 + 5n^2 + 27$ 。我们首先要注意的是,随着 n 的增长, $f(n)$ 的增长速度有多大。只要 n 足够大,在一个多项式中 $f(n)$ 的数值取决于 n 的最高次幂,它的系数(例如 $7n^3 + 5n^2 + 27$ 中的7)以及低次项(例如上式的 $5n^2 + 27$)是不重要的。因此算法复杂性可以用最高次幂的那个项来做充分描述,即上式可用 $f(n) = n^3$ 做充分描述,记作 $O(n^3)$ 。 $O(n^k)$ 叫做 k 阶算法复杂性。

现在时间算法复杂性的最基本的分类是按算法函数分类,分为多项式

时间算法复杂性和非多项式(主要是指指数式)时间算法复杂性两类。多项式时间算法复杂性按幂数其实例形为 $O(\log n)$, $O(n)$, $O(n^2)$, $O(n^3)$, $O(n^{10})$ 等。非多项式或指数式时间算法复杂性函数形为 2^n , 3^n , 10^n , n^n , $n!$ 等等。这两种不同的复杂性函数在实践上有着本质的区别。见下表:

表 6.2 几种多项式函数和指数函数增长率比较

复杂性函数	每小时最多能解决问题的大小		
	用现时计算机	用运算速度增长 100 倍的计算机	用运算速度增长 1000 倍的计算机
n	$N1$	$100N1$	$1000N1$
n^2	$N2$	$10N2$	$31.6N2$
n^3	$N3$	$4.64N3$	$10N3$
2^n	$N4$	$N4 + 6.64$	$N4 + 9.97$
3^n	$N5$	$N5 + 4.19$	$N5 + 6.29$

我们来看看指数算法函数的计算:

在函数类型 2^n 中,每小时能处理 $N4$ 个问题大小,它需要处理 2^{N4} 问题大小。假设计算机运行速度提高 100 倍,则每小时它能处理的问题为 $2^{N_x} = 100 \times 2^{N4}$ 。两边取 2 底对数,则 $N_x = N4 + \log_2 100 = N4 + 6.64$ 。

至于其他非多项式函数,例如 $O(n!)$,用它来解决计算销售员旅行 300 个城市的各种可能路线所需时间问题。如若计算机速度提高 1000 倍,则在此时间里,也只能计算出他旅行 302 个城市的可能路线。

从表 6.2 可以看出,提高计算机的工作效率,则解决多项式时间复杂性算法函数的速度成倍数增加,而指数式时间算法函数则只是略有增减而已。因此多项式时间算法被称为有效的 (efficient),它的解称为“有效解”,而指数时间算法被称为无效的 (inefficient),它的解称为无效解。因而,那些能被证明不能用多项式时间算法解决的问题被视做不易处理的 (intractable) 问题,而那些已知多项式时间算法能解决的问题被视为容易处理的 (tractable) 问题。这类问题,常被称为 P 问题(因 solvable in Polynomial time 而得名)。所有的 P 问题的集合称为 P 类问题。但现实中我们遇到的大多数问题是既不知道解它的多项式算法,也未证明它是不易处理的,这类问题的一个共同特征是它们能被非确定型计算机如非确定型图灵机在多项式时间内

“解决”, 这些问题被称为 NP 问题。现在 NP 问题是不是就是 P 问题 (is = NP = P?) 就成为计算机科学与计算数学问题的世界难题之一。可见计算复杂性问题分类的重要性。

►► 6.4 布莱曼计算极限

计算机是一个物理系统, 物理学的规律决定它能做什么和不能做什么。计算机的运作需要能量, 根据量子力学的海森堡的不确定性关系式 (旧译测不准关系式), 能量可测量的精确度极限为:

$$\Delta E \geq h / \Delta t \quad (1)$$

小于这个能量, 计算机不能识别信号, 不能计算信息。

现在假定计算机在处理信息时按能量 E 进行编码, 按 ΔE 将能量 E 区间 $[0, E]$ 划分为 N 个子区间, 每个区间有 0 与 1 两个状态, 则该系统有 2^N 个状态, 其信息量为 $\log_2 2^N = N$ 比特。按以上的划分, E 最多能处理的信息为, $N \leq \frac{E}{\Delta E}$ 。

根据爱因斯坦质能关系式 $E = mc^2$ 代入上式得其上限为:

$$N = mc^2 \Delta t / h \quad (2)$$

现将普朗克常数 $h = 6.625 \times 10^{-27}$ 尔格/秒与光速 $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒代入上式, 得

$$N = 1.36m \Delta t \times 10^{47}$$

这就相当于当年布莱曼 (Hans Bremermann) 所计得的数字 (2×10^{47} 比特)。它被称为计算极限或信息处理极限。布莱曼对这个极限的表述是:

“不可能存在一个数据处理系统, 无论生命的或人工的系统, 每秒每克质量可以处理超过 2×10^{47} 比特的信息量。”^①天文学家估计地球质量 $\leq 6 \times 10^{27}$ 克, 地球诞生至今寿命 $\leq 10^{10}$ 年, 一年 $\approx 3.14 \times 10^7$ 秒。这样, 根据布莱曼公式来推算, 即使把整个地球当做一个大型的数据处理系统或一个大电

① H. J. Bremermann (1962), "Optimization through evolution and recombination", In M. C. Yovits et al. (eds.), *Self-Organizing Systems*. Spartan Books, Washington, D. C., pp. 93-106.

脑,自它诞生之日起至今所处理的数据量都无法超过

$$\begin{aligned} & 2 \times 10^{47} \times (6 \times 10^{27} \times 10^{10} \times 3.14 \times 10^7) \text{ 比特} \\ & \approx 2.56 \times 10^{92} \text{ 比特} \\ & \leq 10^{93} \text{ 比特。} \end{aligned}$$

10^{93} 比特被称为布莱曼极限 (Bremermann's Limit)。一个问题,如果它的数据处理超过 10^{93} 比特,则我们称它为超计算问题 (Trans Computational Problem)。

不要以为布莱曼极限是很难达到的数字。事实上,下表列出的数字就是大于或等于布莱曼极限的一些数字。

表 6.3

大于或等于布莱曼极限的一些数								
2^{308}	3^{194}	4^{154}	5^{113}	6^{119}	7^{110}	8^{102}	9^{97}	10^{93}

例 1. 图像识别问题。假定有一个棋盘,其空间格阵为 $q \times q$ 块,每块有 k 种颜色中的一种,这就总共有 $K^{q \times q}$ 种图像。如要按一定标准对这些图像进行分类,就要历遍(记录、描述或记忆)这 $K^{q \times q}$ 种花样图像。假定每一方块只有黑白二种颜色,而方阵有 18×18 时,就有 $2^{18 \times 18} = 2^{324}$ 种图像需要识别,这就是一个超计算问题。若颜色有 9 种,对于 10×10 的方阵,也已成为超计算问题,即 $9^{100} > 9^{97} > 10^{93}$ 成为不可计算之数,已超出人类认知之极限。图像识别问题,直接关系到视网膜生理学研究,它的复杂性是巨大的。视网膜有 100 万个感光细胞。即使我们简化地考察每一种细胞,假定每个感光细胞只有两种状态,即兴奋与抑制,则当历遍视网膜整体时,就要处理

$$2^{1,000,000} = 10^{300,000}$$

比特的信息,远远超出布莱曼极限。

例 2. 大规模集成数字电路的检测,即所谓 IC 的检测问题。由于现代半导体工业技术的进步,IC 所容纳的电子元件愈来愈多,线路愈来愈复杂。测试电路如同分析一个黑箱,通过单独控制一个输入变量来观察其输出变量是否如所预期实现了其逻辑函数。假设有一集成数字电路单元 IC,有 308 个输入端和一个输出端,对于二值逻辑来说,就已经是一个超计算问题 (2^{308}) 了。有鉴于此,集成电路不能进行完全检测,一般只是检测所有可能

性中的一部分。

例3. 旅行售货员问题。设有几个城市,旅行售货员必须走遍这些城市,他的可能路线有 $n!$ 种,当 $n \geq 7$ 时, $n! > 10^{93}$ 。只要有 40 个城市, $40! \approx 10^{99} > 10^{93}$ 。这已经超出了布莱曼极限。

例4. 指令性计划经济需要事先统计所有人口丰富多样和千变万化的需要,并根据这种需要分配不同的工厂、企业来寻找和采购各种原材料和劳动力进行生产。这个信息的收集、处理与传递的过程,早已超出布莱曼极限,成为不可能的事。

布莱曼极限的理论意义首先是个认识论问题。它说明人类认识是有限的。像爱因斯坦提出一个光锥问题(超过光速才能达到我们视野的世界是不可知的世界)一样,布莱曼提出一个世界是不能超过 10^{93} 比特的世界,“这就是我们的信息世界:超过这个信息世界就是不可知的”。^① 而在方法论上,布莱曼极限告诉我们,对于理论上的和实际上的超计算问题,我们需要采取简化方法或软化方法进行处理,例如,将要求取得最优解改成要求取得满意解,将要求取得精确解改为可接受的近似解,而这种简化和软化的方法,根据 G. 克利尔的研究,应该建立在模糊集合论的基础上。同时还要注意,不要过分要求定量解,质的定性的研究方法对于研究复杂系统、特别是人文社会复杂系统是完全不可缺少的。片面追求数量化的方法对于人文社会科学特别不合适,因为这些系统的参量太多,经常要超出可计算的极限。

►► 6.5 复杂性形成的离散动力学分析

以上对系统复杂性的讨论,主要是从静态上进行的,下面我们将转入从动态上进行讨论,即讨论系统复杂性是怎样形成的,又是怎样进化和发展的。本节主要讨论系统复杂性是怎样形成的,6.6 和 6.7 将讨论系统结构、功能的复杂性是怎样进化发展的

① W. R. Ashby, (1968) "Some Consequences of Bremermann's Limit for Information Processing Systems". In H. Oestreicher and D. Moore (eds.), *Cybernetic Problems in Bionics*. New York: Gordon and Breach, pp. 69-76.

复杂系统通常是由许多相类同的并且相对简单的部分或元素组成的,部分和元素的行为通常是易于理解的,而整体或系统的行为则难于做简单的解释,而且从对部分行为的理解中不可预测整体的系统行为。这意味着,对于整体的复杂行为没有一个明确的总体算法(without an explicit global algorithm)。为什么会是这样的呢?复杂性是怎样形成的呢?过去我们对于这个问题没有很好的解释,于是早期英国突现主义者,例如 S. 亚历山大和 C. L. 摩根等人,一直强调对于突现与复杂性,我们只能“以对待自然的虔诚心来对待它,它无可解释”。^①但 20 世纪后半叶,特别最近一二十年,由于元胞自动机的研究,提供了最简单和最标准的案例,清楚地说明复杂性和复杂性行为是怎样从元素的简单性中产生出来和发展起来的。因为这种研究是对模型的研究,使我们可以回避这样的问题:免疫系统虽然是复杂的,但其组成元素淋巴细胞也不是简单的;生态系统是复杂的,但其组元的物种群体也不是简单的;股票市场是复杂的,但投机商并不是简单的。现在我们假定系统的组成元素是完全简单的,用数学模型来表现这种简单性和用计算机来模拟这种简单性,看复杂性怎样会由此而形成。现在我们有了一个抽象的计算系统,它在时间上和空间上都是离散的,而其组元的状态以及支配这些状态的规则在计算上是极为简单的,但由此组成的总体模式和构型却可以模拟现实世界的全部复杂性。现在我们就借助这种工具对复杂性的形成进行离散动力学的分析,它与我们将在下一章对混沌和连续动力学的分析起到一种相互引证和相互补充的作用。这种离散动力学分析,是在最近几十年才发展起来的,它在理论上和实用上的潜力都是非常巨大的。

▷▷ 6.5.1 一维元胞自动机

元胞自动机,英文原名为 Cellular Automata,简称为 CA,是一种离散动力学的模型。这种离散的动力学模型是著名的数学家和计算机科学家冯·诺伊曼与他的同事 S. 乌拉姆于 20 世纪 40 年代首创的。冯·诺伊曼当时的雄心是要设计一个脑。

于是就要解决设计出能繁殖自己的机器。在乌拉姆的建议下,他放弃

^① Alexander, S. (1920) *Space, Time, and Deity*. Vols. 2. London: Macmillan, pp. 46-47.

了实现这种机器的具体元素及其运作问题,集中解决在怎样的数学框架下建构一部机器、使用它能复制自身的信息、从而产生新机器的问題。于是他运用元胞自动机成功地解决了设计这种机器的算法问题,它由数千个二维的元胞,按每元胞有 29 个状态组成。这个问题的解决虽然过于复



冯·诺伊曼(1903—1957)与第一台计算机

杂,但在数学上总算解决了难题。20 世纪 70 年代剑桥大学数学家约翰·康威创立“生命游戏”,用元胞自动机“模拟生命”——它的多样性、代谢、生长与繁殖,并且能仿效图灵机实现通用计算(universal computation)的功能。也就是说,任何计算机能解决的问题,元胞自动机都能解决。2002 年英国数学家和物理学家 S. 沃尔弗拉姆(Stephen Wolfram)出版了有关元胞自动机的 1280 页的研究成果《科学新种类》,提出了自然界的复杂性来自简单性的机制,认为整个自然界不过就是一个很大的元胞自动机,引起学界激烈争论。

对元胞自动机的理论分析主要是在一维自动机上做出的,让我们也从一维元胞自动机入手进行讨论。

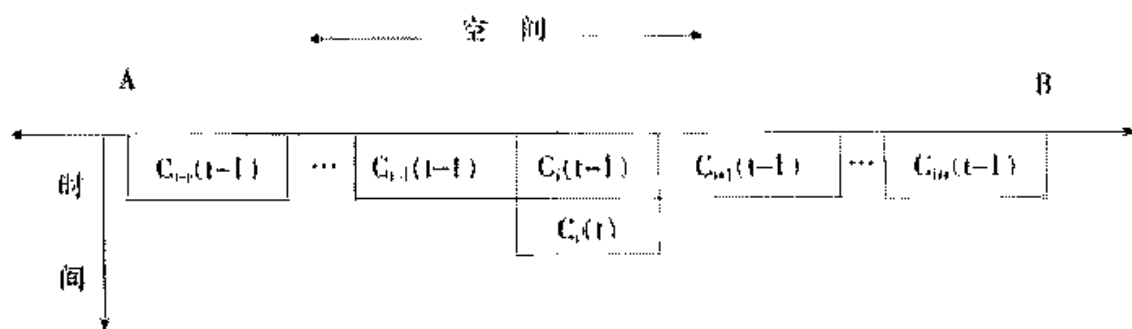
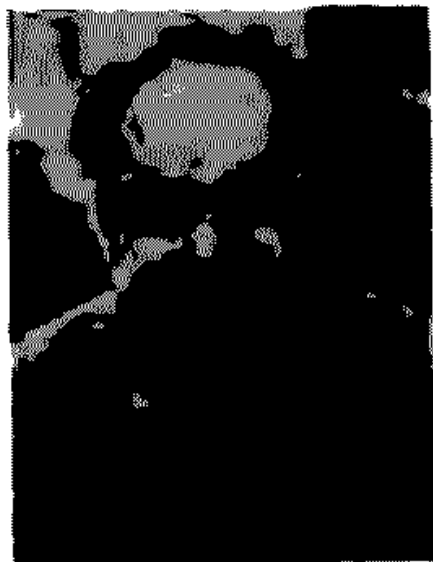


图 6.4 一维元胞自动机的元胞及其邻居

设想一条划分了格子的可无限延长的线 AB,每一个格就是一个元胞(C),每个元胞有 K 个有限的可能状态中的一个状态。不但空间是一格一格地离散的,而且时间也是一步一步跳着走的,由…… $t-1$,到 t ,再到 $t+1$ ……,它由时间维向下伸展来表示。如图 6.4 所示,第 i 个元胞在 $t-1$ 时的

状态用 $C_i(t-1)$ 表示,于是在它左边有 r 个邻居,记作 $C_{i-1}(t-1), C_{i-2}(t-1), \dots, C_{i-r}(t-1)$ 。右边也有 r 个邻居,记作 $C_{i+1}(t-1), \dots, C_{i+r}(t-1)$ 。



S·沃尔弗拉姆(Stephen Wolfram)

那么元胞 $C_i(t-1)$ 的下一个状态 $C_i(t)$ 怎样决定呢? 它按一定规则由上一个时步的邻居状态以及它自身的状态(共有 $2r+1$ 个不同元胞的状态)来决定。即 $C_i(t) = \Phi(C_{i-1}(t-1), \dots, C_i(t-1), \dots, C_{i+r}(t-1))$ 。

现在,我们考察最简单的一种情况。一个元胞,例如 C_{i-1} , 只有二种可能状态:0 与 1(即 $K=2$),而它的下一个状态 C_i 只与自己上一个状态以及它的两个邻居(左邻右舍)的状态共三元组(即 $2r+1=3$)有关,

即

$$C_i(t) = \Phi(C_{i-1}(t-1), C_i(t-1), C_{i+1}(t-1))$$

决定下一个状态 $C_i(t)$ 的三元组的状态有几种可能的组合呢? 只有 $2^3=8$ 种组合,每一个组合记作 a_i , 其中: $i=0, 1, \dots, 7$ 。其组合由下式给出:

111	110	101	100	011	010	001	000
a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0

每一种组合决定 $C_i(t)$ 时可以有二种规则,对应 $C_i(t)$ 为 0 或为 1。这样由上述三元组决定 $C_i(t)$ 便可能有 $2^{2^3} = 256$ 种可能规则。每一种可能规则的编号可用对应着 $a_7 a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0$ 所标示的一个二进制数码来表示。读者读到这里应停下来,运用高中时学过的或可能学过的指数运算和排列组合的知识想清楚这里的数量关系。

现在,我们举出一个可能的规则 $R_{126} = a_7 a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 = 01111110$ 。(因 2 进制数码 01111110 等于 10 进制数码 126,故称这个规则为 R_{126})。这样规则 R_{126} 的 8 种组合决定 $C_i(t)$ 的取值的规则是:

111	110	101	100	011	010	001	000
0	1	1	1	1	1	1	0

只要给出元胞的初始状态,便可以依据 R_{126} 研究元胞状态的演化。当然,我们可以使用代数方法解释地推出一些结果,但多走几步,解释的演算就相当困难。所以大多数情况下,要研究元胞状态的演化,一般都采取数值叠代的方法求解,并用电脑进行运算。现在我们假定在一维元胞自动机上,只有两个元胞的状态为1,即 $C_1 = 1, C_2 = 1, C_3, C_4, \dots$ 和 $C_0, C_{-1}, \dots$ 两边所有元胞状态为0。1的状态用黑色表示,0的状态用白色表示。运用 R_{126} 规则于这个初始状态,我们可以写出最初几个时步的元胞状态演化图。

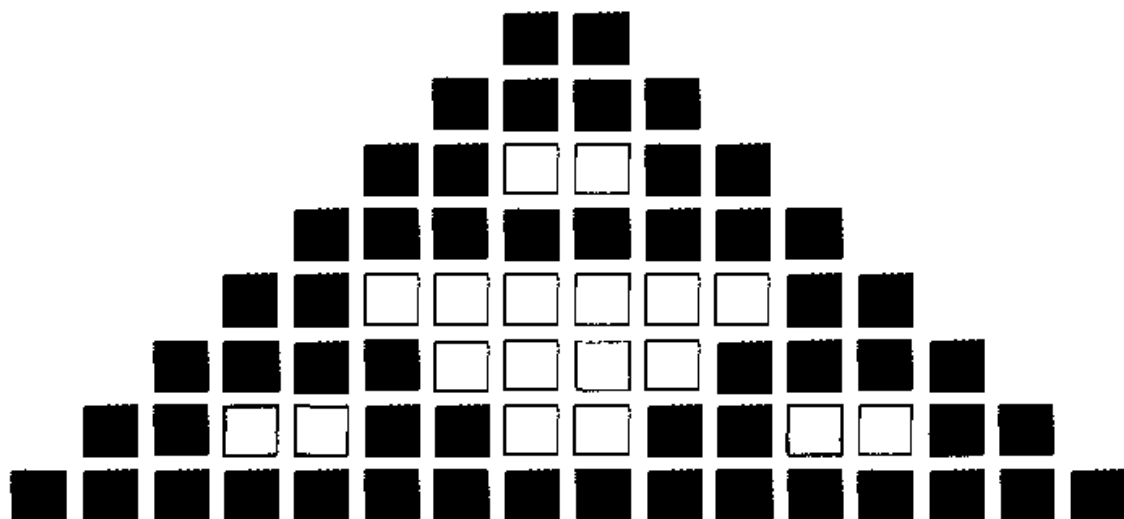


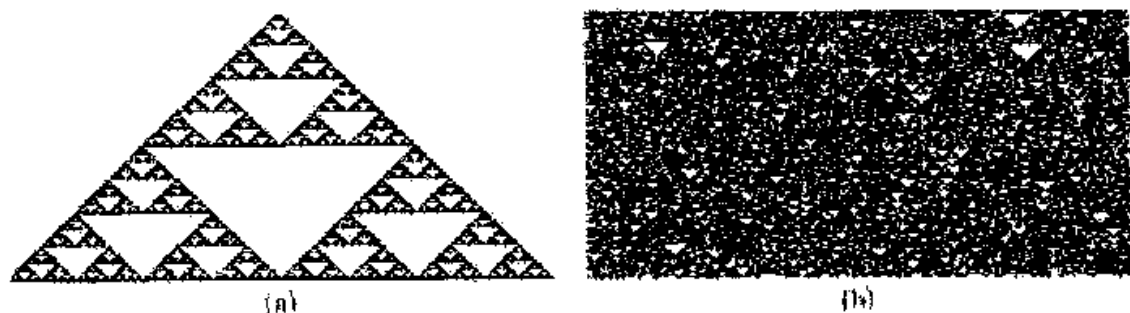
图 6.5 模拟 R_{126} 和初始状态“11”的最初几步演化

但是模拟 R_{126} 及从“11”开始的较长时步的演化,就只有靠计算机帮助。运用元胞自动机软件会很容易做到这件事。现在,我们在直线上设置的元胞数有 512 个,时步为 256。计算机绘出下图,图(a)有两个中间元胞初始状态为“11”,其余 510 个元胞初始状态为 0。图(b)512 个元胞的初始状态由随机选择决定。这样,我们便得到下列的图样。

图 6.6(a)的初始状态为……00011000……被称为帕斯卡三角形,

图 6.6(b)的初始状态由随机选择决定。

请注意,本例是元胞状态数和邻居数目最小的一个例子。如果我们假设每元胞有 10 个状态数即 $K = 10$,而决定一个元胞状态的邻居数左、右各

图 6.6 R_{126} 描述的元胞的两个进化史

两个,即 $r = 2$,则决定某个元胞状态的邻居(包括它自己的上一时步的状态)数便有 $2r + 1 = 5$ 个。可能状态组合便有 10^5 个,而可能的规则数目就有 $= 10^{10^5} = 10^{100000}$ 个。要分别研究这些规则,每个规则即使看一眼也超过了布莱曼的认识极限。而全宇宙的分子数目也不过只有 10^{40} 个。因此,为了研究各种元胞计算规则,就必须对这些规则进行分类。

▷▷ 6.5.2 沃尔弗拉姆的元胞自动机分类

20 世纪 80 年代,S. 沃尔弗拉姆单枪匹马复兴了元胞自动机的研究。他的主要贡献之一就是对各种元胞自动机进行分类。他认为,元胞自动机共有四类:

类型 I:演化导致一个同质的状态,不再变化了。这在程序上相当于只实行几步就停止的程序。它相当于在系统动力学中,向着一个固定点(或称为极限点)吸引子演化。研究复杂性的这个种类引不起太大兴趣,不过它是作为 CA 谱中的一个极。

图 6.7 展示出这种元胞的自动机的图式,每张图上栏的数目是规则的编码,这是用 5 进制来表示的数目字。数位的数符有 5 个,即 0,1,2,3,4 逢 5 进 1。这种元胞自动机状态数 $K = 5$,邻居数 $N = 3$ 。这个规定适合于从图 6.8 到图 6.10。

类型 II:演化导致简单周期的结构,通过有限个不变数目的状态无限循环下去,它相当于实施一个无限重复的程序。在系统动力学中,它相当于连续动力学向着极限环的演化。图 6.8 展示了类型 II 的 6 个例子。图上的数码意义与图 6.7,6.9,6.10 相同,都是可插入元胞自动机计算机软件中绘图的。

00040001002000200020030000004	00100001000000200001030000014	00001001000000200400030100004

图 6.7 沃尔弗拉姆类型 I 的实例

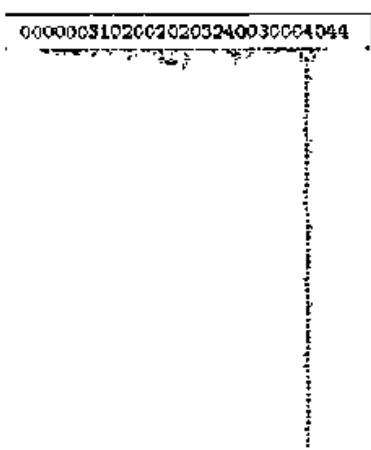
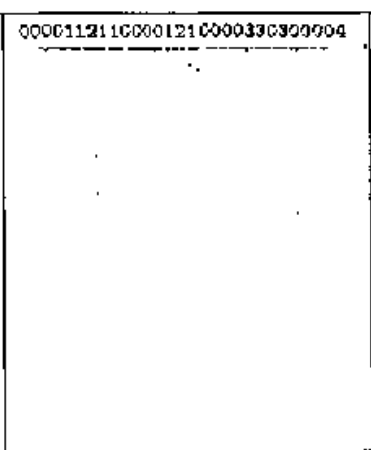
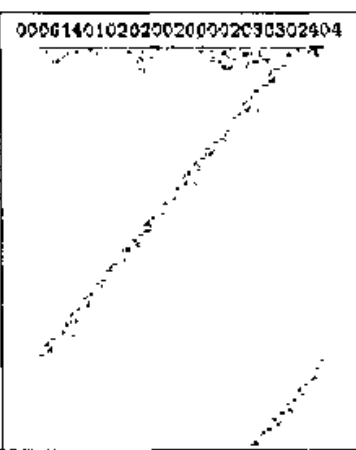
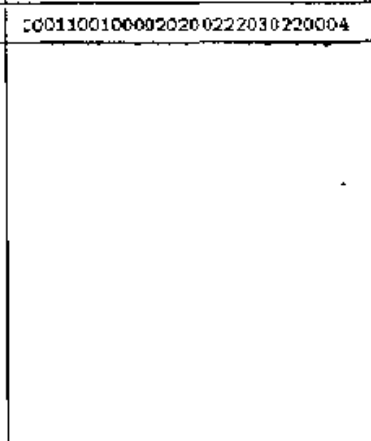
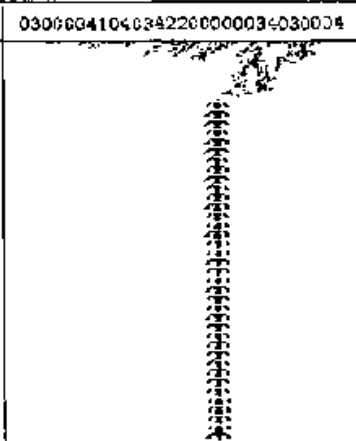
00000031020020203240030004044	00001121100001210000330300004	00001401020200200002030302404
		
00300201400020204030031200004	00011001000020200222030220004	03000041040342200000034030004
		

图 6.8 沃尔弗拉姆类型 II 的实例

类型 III: 演化导致混沌状态, 这是一种“非周期的”(aperiodic)随机似的模式, 就像坏的电视频道不断发出干扰的雪花那样。这种图形向着我们在下一章将说到的奇异吸引子演化, 它的行为特征有三点与连续系统动力学中的混沌特征相同: (1) 给定有限空间的大小, 它永远不重复自身, 即使周期很长也不重复。(2) 对初始条件极为敏感, 初始状态稍加改变, 后续状态会完全不同。这在程序上使它可以成为伪随机数发生器 (pseudo-random number generators), 即给定一个初始数目, 它会产生出一串彼此完

全无关的数目,而初始数目稍加改变,它会产生出与此完全不同的一串数目字。这是一种典型的非线性特征。(3)它可以在短期里达到极限环,但极不稳定,略有干扰就返回混沌状态。图 6.9 显示了类型 III 的这些特征。



图 6.9 沃尔弗拉姆类型 III 的实例

类型 IV:演化导致复杂的整体结构,这些模式或构型在时空中运动着。这种形式的元胞自动机,有一些可以实现通用计算机的功能,从而模拟自然界的无限多样性和复杂性的现象。沃尔弗拉姆说这种“元胞自动机可以当做计算机使用。它的初始构型所显示的数据通过时间演化进行处理,计算的通用性意味着适当的初始构型能解释任意的算法程序”。^① 图 6.10 展示了沃尔弗拉姆的第 IV 类,大多数的元胞自动机的行为都属于第 I, II, III 类。每一类都落入一个空间区域,但第 IV 类是复杂结构的那个类,在元胞自动机中是很稀少的,它的位置一直到最近才得到确定,它是徘徊于混沌与周期性行为之间,即所谓“混沌边缘上”,因而它的行为既不是完全随机的,也不是完全有序的。正因为这样它才是最复杂的,甚至是有生命的。我们在 6.2 中将混沌边缘性当做是复杂性的基本特征,根据就在这里。

▷▷ 6.5.3 朗顿的 λ 参量

C. 朗顿(Chris Langton)和沃尔弗拉姆一样,十分注意元胞自动机的分类,但他从一个更为普遍的方式来考察它。他注意的问题是:(1)在哪一个关节点和控制点上,元胞自动机的行为从一个类型转变到另一个类型。(2)如果第 IV 类是处于第 II 类与第 III 类分界点上,用一个什么参量来说

① S. Wolfram, "Universality and Complexity in Cellular Automata," *Physica D*, 10: 1984, pp. 1-35.

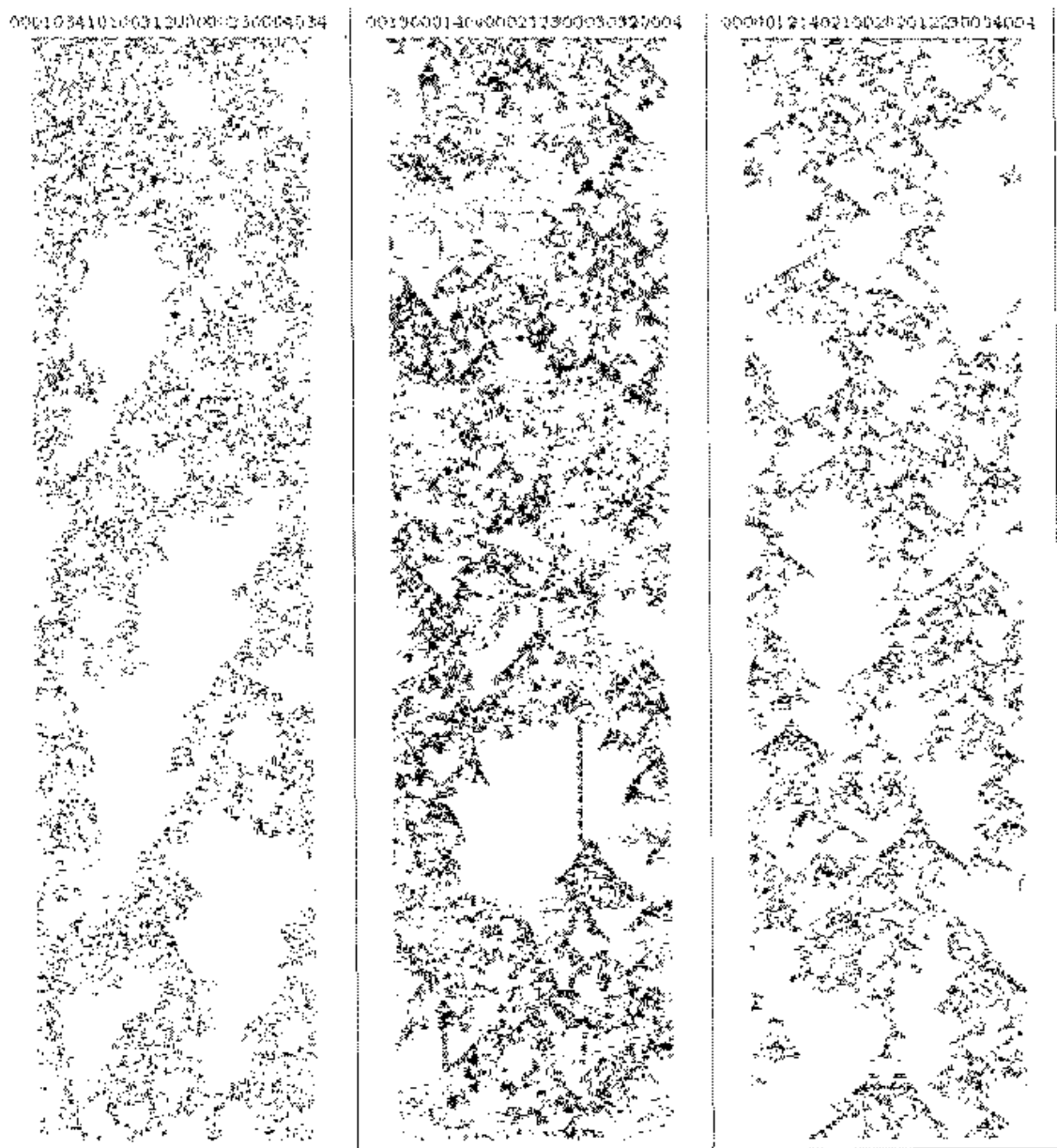


图 6.10 沃尔弗拉姆类型 IV 的实例

明这个分界点。

朗顿首先界定了一个元胞的静止状态,即它的状态为 0 或叫做“不活的”,然后分析元胞状态转换的规则,看看哪些规则会导致它的邻居决定这个被研究的元胞是 0 (“不活的”),又有哪些规则导致其邻居决定这个元胞是 1 (“活的”)。于是他将所有有关的规则划分为两个集合。那么,对应于这个元胞是死是活,是 0 是 1 的规则有多少个呢?它有 K^2 个。为简单起见,将这个规则数记为 N ,将导致这个元胞处于静止状态的规则数记为 n_0 。于是我们就有一个参量 λ :

$$\lambda = \frac{N - n_q}{N} = 1 - \frac{n_q}{N}$$

它表示导致某元胞非静态的规则数在所有规则中的比例,表明元胞状态转换规则导致元胞处于活动状态的概率。例如按 6.5.1 的 R_{126} 实例计算,这里 R 的 λ 值为 $(8-2)/8 = \frac{3}{4}$ 。当 λ 值较小时,该规则集导致的元胞自动机处于趋向固定点和极限环的状态,即属于 I 类或 II 类;而当 λ 较大时,相应规则集导致元胞自动机处于混沌的状态。按沃尔弗拉姆所举出的四类例子来看(其中 $K = 5, r = 1$),这里类 I 的三个图对应的 λ 数为 0.266880, 0.188749 和 0.229069,平均值为 0.22823267,接近 $\lambda = 0$;类 II 的 6 个图对应的 λ 数为 0.522330, 0.432013, 0.326822, 0.441331, 0.43084 和 0.483174,平均值为 0.43941967;在类 III 中,三个图对应的 λ 数为 0.821146, 0.787008 和 0.841306,平均值为 0.8164867;而在类 IV 中,即复杂性结构中, λ 值为 0.430669, 0.514982, 0.559872,平均值为 0.501841。直觉地可见复杂性是介乎固定点与混沌态之间。下图就是朗顿绘出的按 λ 变化的规则空间表现图和由 Wikipedia 百科全书绘出的复杂性与 λ 的函数关系图:

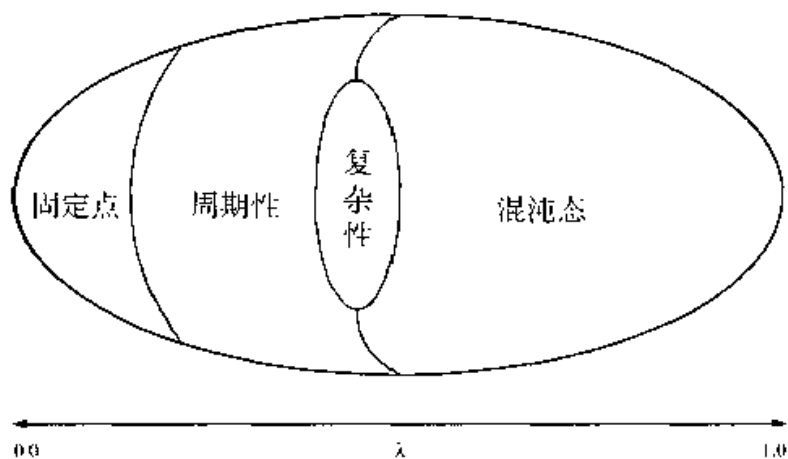
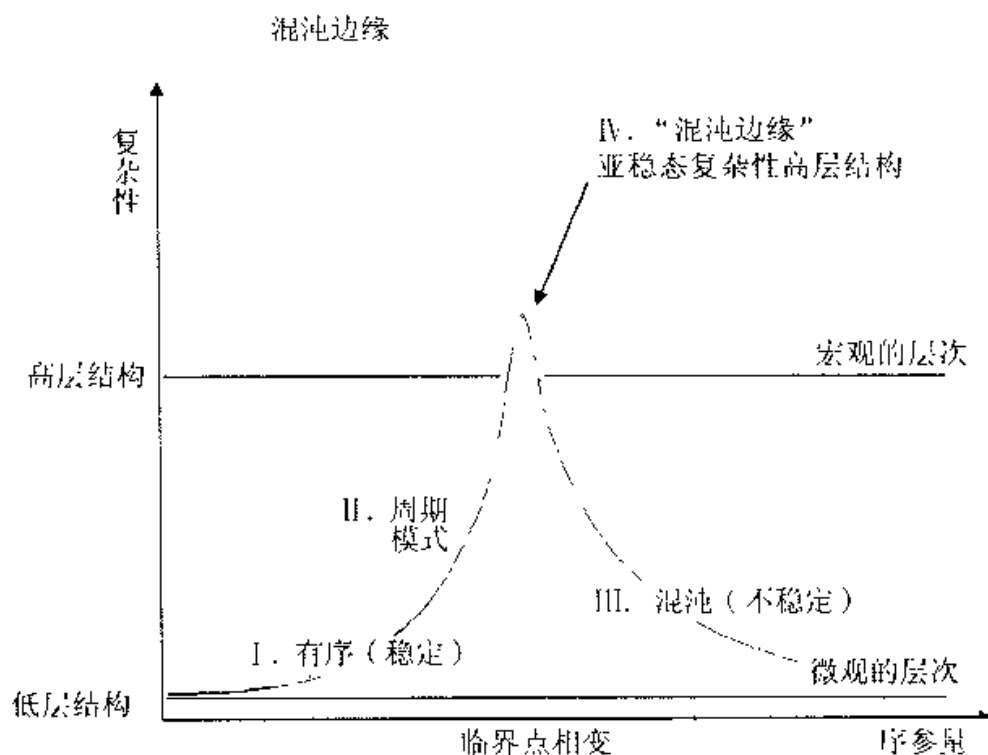


图 6.11(a) 朗顿的由 λ 决定的规则空间表现图

▷▷ 6.5.4 J. H. 康威生命游戏

在 20 世纪 60 年代末,剑桥数学家 J. H. 康威企图扩展冯·诺伊曼的研

图 6.11(b) 复杂性与 λ 函数关系图

究。冯·诺伊曼虽然成功地设计了自我繁殖的元胞自动机，可是他用了几千个有 29 个状态的元胞，设计书写了 150 多页纸。康威旨在重构这个工作。如果能用一种最简单元胞自动机又能实现通用计算岂不更好吗？他用的是二维元胞自动机，这种元胞自动机像一个广大无边的棋盘，每一格是一元胞，每元胞只有两个状态，即 $K = 2$ ：“活”与“死”，“生成”与“消失”，“1”与“0”。每个元胞的邻居，就是挨近这个小方块的四条边的四个小方块邻居以及在对角线上与这个小方块四个角接触的四个小方块邻居。

决定一个元胞的状态的行为规则异常简单：

1. 如果一个活元胞小于二个活邻居，则它就“死亡”（孤独者死）。
2. 如果一个活元胞有超过三个活邻居，则它死亡（拥挤者死）。
3. 如果一个死元胞精确地有三个活邻居时，它变为活的（繁殖）。
4. 如果精确地有两个活邻居，则元胞状态保持原状（不变）。

康威二维元胞的状态以及这个模拟生态原理的行为规则是异常简单的。但是谁能想到这么简单的行为通过相互作用和叠代运作，却能模拟出可能的与现实的、自然的与人工的生命的各种形态与现象，代谢、生长与繁殖，进化与混沌边缘的多样性，起到通用计算机的作用呢？下面我们只是最

简要地说明这一点。

我们设想从一个随机分布着的死的或活的元胞大棋盘出发,开动电脑程序,使元胞按四种行为规则行事。经过一段时间后,你会发现许多“生命形式”或“生命中的客体形式”。我们首先列举其中的三种:

1. 生命中的静态活客体的构型,其中有如图 6.12 的模式,这四种构型的每个元胞满足持续活下去的条件。只要不受外界干扰,它永远存在着。这种形式在通用计算中是重要的,因为它可作为记忆或贮存器的一种基本形式:

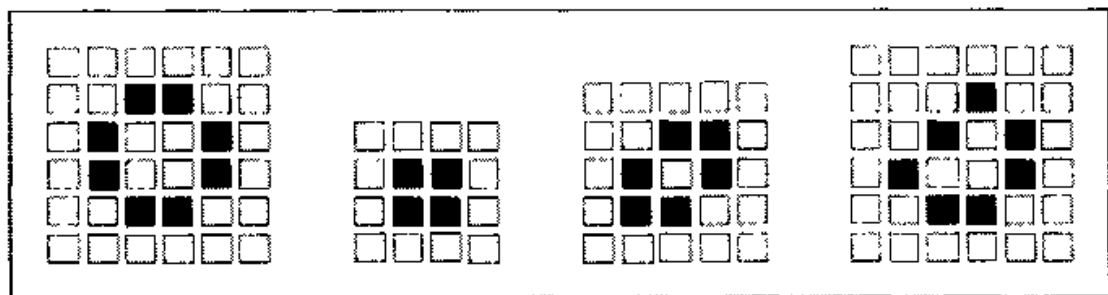


图 6.12 康威生命中静态客体的实例

2. 闪动者:它是一种经周期状态变化返回自身的构型。图 6.13 展示了三个不同的闪动者,它可运用于计算中的与时间平行的同步叠代运算。

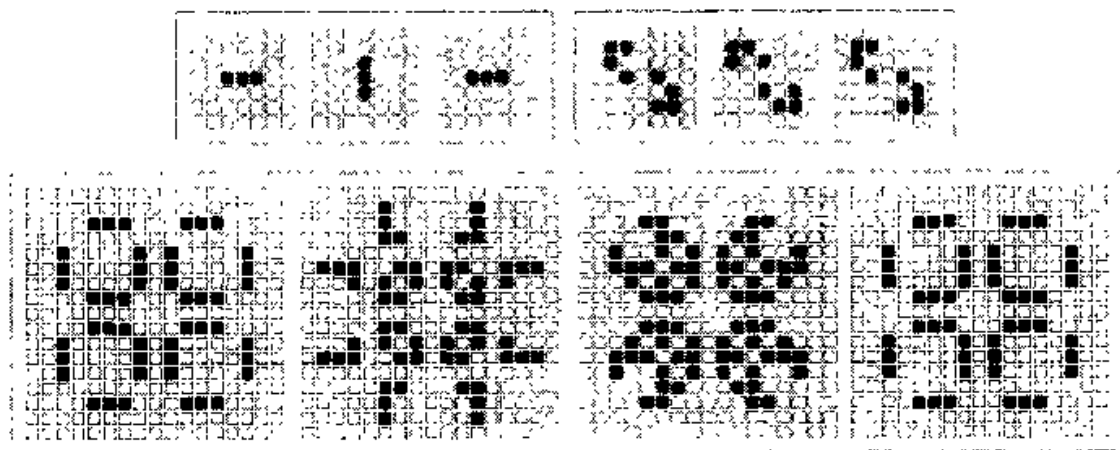


图 6.13 康威生命游戏中的周期客体实例

3. 滑翔机与鱼:这是一种能在空间中运动的由元胞组成的模式,像动物小爬虫一样跨越元胞空间运动。第一种称为滑翔机,它沿着元胞空间的对角线运动。另一种形式称为鱼,它在元胞空间中做水平运动。当然,运动

模式与构型不止这两种,但有了滑翔机与鱼,就可以做8个方向的信息发送和接收的工作。

4. 滑翔机枪和发射滑翔机枪的机枪

元胞自动机的运动的构型有一个特点,就是当它们以适当的方式碰撞时,能产生出其他运动的构型。例如有一种运动着的构型能,它的两个部分的碰击,能不断发射出滑翔机,等于辐射出滑翔机流。这个滑翔机流遇到某个固定的构型(吞咽者),后者能不断消灭滑翔机,成为它的吞咽者,而其构造十分简单。进一步还有一种组合,能发射出滑翔机枪。康威开辟的研究二维元胞自动机的新路,以很简单的方式实现了冯·诺伊曼自我繁殖机器的理想。生长、代谢、繁殖、多样性这些生命复杂功能都从最简单的元胞、最简单的行为规则通过叠代运动而模拟出来了,更进一步看,元胞自动机的生命游戏或生命模拟能完全实现通用计算机的功能。

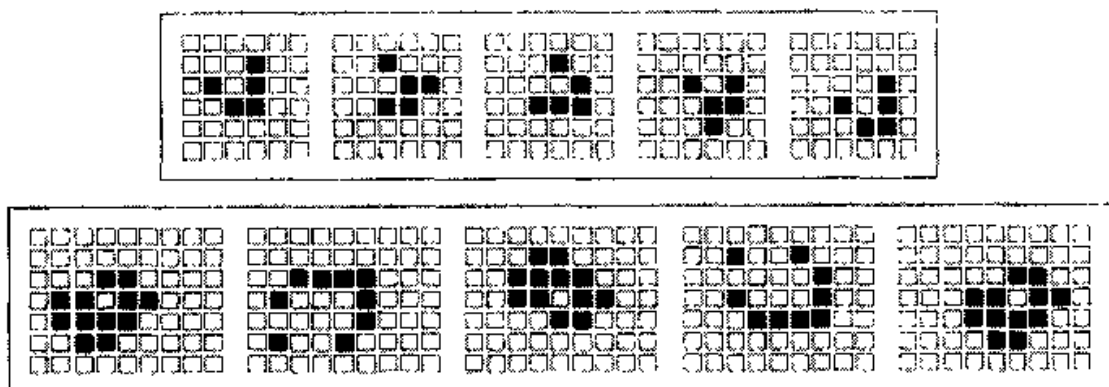


图 6.14 滑翔机与鱼

大家知道,全部逻辑运算的基本算子,不过就是或($A \vee B$)与($A \wedge B$)非($\bar{A}$)三种运算,一切复杂的语句,无论其信息量有多大,复杂性有多大,都可以由这样的基本算子从基本语句中组合起来。一切数字计算机,无论其电路有多复杂,解决的问题多困难,它的基本电路只有或门、与门与非门。所以只要元胞自动机实现这三种逻辑电路,它也就有实现通用计算机的能力。

现在让我们来设定元胞空间中一个位置 x ,然后用滑翔机枪发射一连串滑翔机轰击这个位置,就像第二次世界大战时日本的自杀式“神风队”飞机轰击美国某只军舰一样。在等距的时间间隔里,如有轰击为1,没轰击为

0,于是滑翔机的发射系列便携带了一串二进制的信息输到这个位置 x ,就如同计算机的电子流携带着高电位或低电位的脉冲将一串信息传到 x 处一样。请看下图:

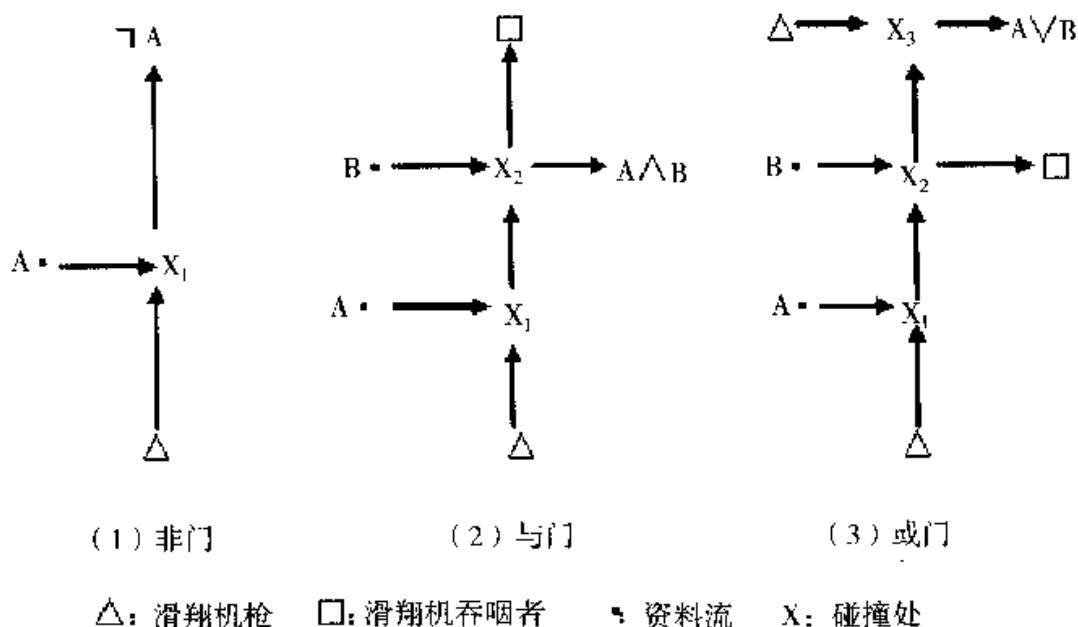


图 6.15 在二维元胞自动机中建立逻辑门

1. 非门的实现:当滑翔机枪发出一部滑翔机到达 x 时,它的值为 1,如果 A 这时没有射滑翔机到 x_1 , x_1 的数位为 0,底部滑翔机顺利到达终点,得到 1。如果这时 x 没有空位,它已为 A 发出的滑翔机占领,于是两架滑翔机相撞,信息到达 $\neg A$ 处为 0。这就实现了非门 $\neg A$ 的真值表(见表 6.3)。

2. 与门:如图 6.15(2),我们可以利用非门建立与门。如果 A 是 1,它便在 x_1 处与滑翔机碰击, x_2 处变成 0,留下一个空洞让 B 为 1 的滑翔机通过 x_2 点达到终点 $A \wedge B$,实现了 $1 \wedge 1 = 1$ 。而 A 与 B 的其他情况都使 $A \wedge B$ 为 0,这就实现了 $A \wedge B$ 的真值表。

表 6.3 与门或门非门的真值表

A	B	$A \wedge B$	$A \vee B$	$\neg A$
1	1	1	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	1
0	0	0	0	1

3. 或门:图 6.15(3)表明,这里是利用非门和与门建立或门。从 x_1 上输出的 1 通过顶上横摆着的非门变成 0,而从 x_2 上输出的 0 通过顶上横摆着的非门便成 1,这便实现了或门的真值表(见表 6.3)。

以上的离散动力学分析表明,一切系统,无论自然系统还是人工系统(包括模型系统),它们的复杂性都可以通过简单性的组元叠代演进而形成。

►► 6.6 结构功能的复杂性及其增长

上节讨论了系统复杂性形成和增长的动力学机制,从本节开始,我们要运用第 4 章《系统思想》中的适应与进化的观点来讨论随着变异与选择系统的结构、功能、层次的复杂性怎样趋向于增长。

▷▷ 6.6.1 结构复杂性及其增长

1. 我们首先需要回顾系统的结构与功能的概念。在本书第 3 章中,我们曾经指出,所谓系统的结构就是系统中诸元素之间的相互关系或关系网络,正是这种关系在特定的空间中将元素整合成相对稳定的系统,形成重复出现的模式与构型。本节讨论结构复杂性时,着重讨论这些元素的空间秩序的复杂性。与此相对应,所谓系统的功能,指的是系统在与外界环境相互关系中呈现的变化和所表现的行为。系统的功能,主要是一种“时间上的秩序”。这样,我们分析系统的结构与功能时,主要有三个维度:第一个维度是空间的维度,第二个维度是时间的维度,第三个维度是尺度(scale)的维度。由于不同的尺度有不同的层次,所以也可以称之为层次的维度。有了这几个维度,我们首先要分析的是结构复杂性及其增长。

2. 结构复杂性的增长。

根据我们在第 4 章《系统思想》中讨论的适应性进化的基本原理,进化是通过多样性的产生和适应性的选择而实现的。那么进化过程是通过什么途径增加结构的复杂性呢?

(1)进化过程结构多样性的产生。只要系统在进化,它就会通过许多途径来增加变异和多样性,这种变异和多样性可以是内部的,即它的组成

要素和内部关系的突变,例如染色体基因的突变。变异和多样性也可以是外部的,即一个系统与另一系统的组合,如染色体之间或DNA之间的重组。这些都带来多样性的增加。这种增加,可以是共时的,也可以是历时的。即使是同质系统,在进化过程中可以经过轨线的分叉,分化出许多不同构型、结构,细胞分裂到一定的阶段就产生组织的专门化,这就是一种历时的多样性产生过程。我们曾经讲过,假定其他情况不变,系统的形态与结构愈多样,系统就愈复杂,这是结构复杂性增加的第一个途径。

(2)进化过程中,系统元素之间的相互关系会愈来愈紧密。进化的另一个机制是适应性选择,即淘汰那些稳定结构比较差的变异,保留那些元素之间相互联系较强的、稳定性较高的,即生存概率较大的形态。这就是所谓适者生存,就是稳定者生存。根据我们在本章第1节有关复杂性概念的论述,在其他条件不变的情况下,系统元素联系越紧密,系统的复杂性愈大。将第(1)点与第(2)点结合起来看,复杂性存在于多样性与联系性中介里,当多样性和联系性都因进化而加强时,结构复杂性便向上增长。

(3)让我们进一步从系统与系统之间的相互作用来看进化过程中结构复杂性的增长。设有系统A,由于内部的变异和选择产生了内部稳定的结构。假定A与另一系统B相接触,对于B来说A便是它的环境。假定B发生变异,这种变异与A相适应。这时B进入生态龛或小生境。反过来说,B也是A的环境,如果是相互适应的,A与B组成一个新的高阶系统或超系统。许多共生结构就是这样形成的。真核细胞是由若干个原核细胞共生而成,多细胞是由若干个原核细胞共生而成,多细胞有机体由细胞之间相互适应而形成,家庭由原是单身汉的个人相互适应共生而形成。生态系统是许多物种群体之间共生适应而形成的,这种结构新层次的形成是系统的尺度上、即层次结构和垂直结构上复杂性增加的表现。

3. 结构复杂性的自我加强。^① 由于上述机制,在进化中,结构复杂性不但有着增长的趋势,而且在一定范围里还存在着自我加强的趋势,即加速增长的趋势。在这方面,进化论生物学家积累了充分的证据证明生态系统倾

^① 复杂性自我加强的概念,是斯坦福大学W. Brian Arthur首先提出来的。见W. Brian Arthur, "On the Evolution of Complexity". in George Cowan et. al (ed) *Complexity: Metaphors, Models, and Reality*. Addison-Wesley, 1994, pp. 65-82.

向于愈来愈复杂,即进化过程中生态系统的物种多样性不断增加,物种之间相互依赖不断加强。地球的地质史向我们表明某个特殊的生态龛,例如,一个海岛上的生物,原初只有少数几个物种,但由于这些物种的分化以及新的动植物移民者,不仅占领了原有的小生境,而且创造了愈来愈多的小生境,这就使得系统的结构愈来愈复杂,愈来愈多样。达尔文考察了加拉帕斯群岛,发现雀类的结构多样性是这样发展起来的,而社会生物学家 E. O. 威尔逊在他 1992 年出版的《论生物的多样性》一书中也充分说明了这一点^①。这个过程可以表述如下:假设有一个新物种 x 占领了迄今还空着的小生境,而 x 的存在本身就创造了一组新的小生境,许多不同的物种就可以利用由 x 而产生的新资源。例如某种寄生虫可以吸它的血或寄生于它的肠中,而捕食者可以通过捕食它而生存下来。已有一些植物或微生物利用它的粪便或其他排泄物而生长起来,而还有一些物种可以利用它抛弃了的洞穴。这些新的物种又可以创造出新的小生境。系统的结构复杂性因此而加速发展。这些物种之间相互依赖,只要取走了 x ,就会消灭掉许多其他的生命。

将生态案例推而广之,在进化中每出现一个新的系统,它就变成一个新的选择器,提供了更多的机会,使更多的新系统适应于它。只要占领小生境的新系统能创造出超过一个新的小生境,即超过临界值 1.0,结构的复杂性便会成指数增长,导致一个复杂性发展的正反馈阶段。S. 斯图亚特·考夫曼在《宇宙为家》一书中讨论了自催化化学网络系统复杂性增长过程,其中所有的分子类型都或者是化学反应的底物,或者是反应的催化剂。在这里随机的组合一般会增加分子的多样性,而一旦更大的原始多样性(变异)或更高的催化概率达到临界点,系统连续产生的新的化学种将催化更多的化学种,于是化学的复杂性就会成指数增长。^② 他还指出,从化学系统到生态系统,这种超过临界点时复杂性指数增长的规律都是适用的。他说:“一方面,每一个生态系统都处在亚临界——超临界之间,可是,不同生态系统之间还是会交换物质,共同营造一个超临界的生物圈,这个生物圈别无选择,只能坚定无情地向着更加复杂的境地迈进。”^③(见图 6.16)

① E. O. Wilson, *The Diversity of Life*. Belknap Press, Cambridge MA, 1992, p. 32.

② 斯图亚特·考夫曼:《宇宙为家》,李绍明、徐彬译,湖南科技出版社 2003 年版,第 80 页。

③ 同上,第 159 页。

多样性定律,一个系统要达到对环境的某种变量的控制,它能够实施的行为的多样性必须大于或至少等于它需要补偿的环境干扰的多样性。系统的有效对抗行为的多样性愈大,它能抵消干扰、纠正偏差的可能性愈大,从而系统适应环境的“空间”(多维空间)即它的潜在生存空间和生存概率就愈大。在其他情况不变的条件下,控制行为的潜在多样性愈大,它的适应度就愈大。例如,一种动物能够寻找到和消化得了的食物的多样性愈大,它在巨大的多样性的环境下生存和繁荣的可能空间就愈大。因此,根据必要多样性定律,进化通过自然选择,倾向于增加控制,增加内在的行为多样性,增加功能的复杂性。

2. 但是我们这里讲的系统的行为与功能的多样性,指的是潜在的多样性。面对某个特定的环境,或环境的某个特定的干扰,每个瞬间只能采取一种行为,这就产生了系统的行为的选择与决策的困难。行为的潜在多样性和复杂性越大,每一次行为选择与决策就愈困难,并且耗时愈多。系统要解决一个问题,即纠正一种系统的期望状态(目标状态)与当前状态的偏差,常常需要一系列行动的组合,例如,要缩减饥饿的感觉,解决饥饿问题,饥饿的肉食动物必须寻找、确定和瞄准被掠食者的位置,潜近它,追赶它,抓住它,杀死它,撕开它,分解它,吞咽它的肉。要从一系列可能的多样性行为中选取某个合适的行为状态的序列便产生了所谓“组合爆炸”。如果要从100种可能的行动中选一种,当解决问题需要10个行动组成的序列时,就需要从 $100^{10} = 10^{20}$ 可能行动中进行选择,这种选择实际上已经是不可能的了。而当解决问题需要25个行动组成的序列时,就需要从 $100^{25} = 10^{50}$ 可能行动中进行选择,假设这只动物的脑有一公斤重,对于处理 10^{50} 的信息来说,已超过布莱曼的计算极限。

西蒙早在1962年就曾经指出,解决这个决策复杂性问题的最一般原则就是对决策问题进行分解,将它分解成为相对独立的子问题,每个子问题由它的子目标来进行描述,以子目标为基准加以解决^①。每一个子问题是从系统可能多样性行动集合的大大减缩了的子集中选择行动来加以解决的。

① H. A. Simon (1962), "The Architecture of Complexity", *Proceedings of the American Philosophical Society* 106. pp. 467-482. in George J. Klir, *Facets of Systems Science*. pp. 541-559.

例如追赶的行为由腿的不同的运动的组合来达到,而撕裂的行为由牙口部的运动与颈部的运动的组合来完成。每一个子目标由少数一些相关的系统功能来加以实现。不同于问题之间的联系由高一个层次来加以控制,其中“猎取猎物”的目标由各种子目标相互协调而组成。而猎取猎物又由更高的层次来加以控制,这就是更一般的问题,即消除饥饿问题。对于人类来说它又由“打猎”、“采集水果”和“挖掘植物根块”这些子目标协调组成,这些诸多的子目标最后由不同的较低层级的活动、功能与行为来加以实现。这样,进化不仅导致功能复杂性的增加,而且导致功能层次的增加,功能层次复杂性的增长。

对于功能复杂性层次的增长,奥林于 1979 年提出了“必要的层次定律”(the law of Requisite Hierarchy)来加以解释。他将这个定律表述如下:“调节能力的缺乏可以通过较多的组织层级来加以补偿”。^① 对于生命系统的层次控制模型,W. 鲍威斯于 1973 年提出了感知控制论,将认知与行为划分为 11 个层次,并进行了十分精细的分析。^② 对于这种控制层级的增加,更高控制层级的突现,V. 图琴称之为元系统跃迁。^③ 于是进化增加结构功能的复杂性必然伴随元系统跃迁。

3. 功能复杂性的自我加强。应该说,系统的功能复杂性是有一定的限度的。首先,环境作为一个整体来说,它包含了系统作为自己的一个部分,在某种复杂性尺度上,它的多样性和复杂性都大于系统自身的多样性和复杂性。所以进化的系统是永远也不可能完全控制它的环境的(这就是说,它不可能在所有可能的环境下生存与繁荣。例如人类在太阳上和在海王星、海王星上便不能生存)。一般说来,系统只可以聚集充分的多样性来控制它的直接环境的许多重要参量。我们当然可以想像进化会进一步提高系统功能的多样性和复杂性,但它永远不能与环境的无限多样性与复杂性相匹配。从另一方面来看,当系统增加了内部功能与行为的复杂性时,就导致

① A. Y. Aulin (1982) *Cybernetic Laws of Social Progress*. Pergamon, Oxford, p. 115. A. Y. Aulin (1979), *The Law of Requisite Hierarchy*. *Cybernetics* 8, pp. 259-266.

② W. T. Powers (1973) *Behavior; the Control of Perception*. Aldine, Chicago, pp. 83-175.

③ V. Turchin (1977), *The Phenomenon of Science. A Cybernetic Approach to Human Evolution* Columbia University Press, New York, chapter 3. p. 1.

了决策的困难。这种决策困难虽然可以通过增加系统的组织层次而得到一些缓解,但它并不可能根本解决功能行为多样性与决策困难的矛盾,于是必然达到一个平衡点,在这平衡点上,系统只能通过牺牲一方来换取另一方。例如以减少行为的潜在多样性来换取决策的容易进行,或者用增加决策的困难性来换取行为的潜在多样性。因此这个平衡点称之为交易平衡点(trade-off point)。这就是环境干扰的多样性及其要求的系统功能行为的多样性与决策的困难性或者还有其他由复杂性带来的限度之间的动态平衡。病毒在较低的功能多样性上达到了这个平衡,而人类则在相当高的功能多样性上达到这个平衡点。不要以为人类能控制一切,或者将来能控制一切。必要的多样性定律、必要的层次定律以及信息世界的极限定律,都说明人类的能力是极其有限的,对此我们应有自知之明。

不过在一定的限度内,环境还是迫使功能多样性和复杂性的自我加强。这是因为如果系统A的环境也是由进化着的系统所组成(设这种环境为B,C,D……),则它们也经历着非对称的多样性增长而达到自己的交易平衡点。由于B是A的环境的一部分,反过来说A也是B的环境的一部分,当A的多样性增加、以较高的多样性和复杂性水平达到平衡点时,为了控制更加多样和复杂的环境以适应环境,这就导致B有更强的需要来增加自己的多样性和复杂性。结果就造成了增加功能多样性和复杂性的竞赛,造成增加功能复杂性的正反馈,这就是所谓功能复杂性的自我加强。为了说明这种现象,范·瓦伦(Van Valen)于1973年提出了“红皇后原理”(Red Queen Principle)^①。他将这个原理表述如下:“仅仅为了适应与之共同进化的系统,一个进化系统不断发展自己是完全必要的”,这个原理的名称来自艾丽丝漫游奇境记中的红皇后的隐喻:“你必须拼命奔跑,为的是保持原地不动”。

这个原理的最明显实例是生命世界的军备竞赛,捕食者(如狐狸)与被捕者(野兔)在奔跑的速度上的竞赛。为了对付野兔作为防卫手段的极快的奔跑速度,狐狸必须发展出作为进攻手段的加快的奔跑速度,直至达到它们发展的极限。另一个明显的例子是现代社会。为了更好地解决我们在环

^① L. Van Valen (1973), "A New Evolutionary Process". In: *Towards a Theoretical Biology*, Waddington C. H. (ed.) Aldine Chicago, pp. 106-128.

境中遇到的问题,个人与组织都必须愈来愈多地获取知识与资源。但你的合作者或竞争者也都要愈来愈多地获得知识与资源。他们是你的环境的一部分,为了生存、发展与自我实现,你也必须获得更多的知识、工具与资源,这就导致“信息的爆炸”,功能复杂性的大大增强。当然我们说过,这个复杂性是有极限的,也许人类社会离这个极限已经为期不远了。

▷▷ 6. 6.3 复杂性与进化

以上的讨论并不说明所有的进化系统都会不断增加复杂性。有一些系统,如病毒、蜗牛、乌龟与苔藓,它们已经达到很好的交易平衡点,环境并没有对它做复杂化的要求。不过在一个大的生态系统里,我们除了看到这些保守的物种的实例之外,更多看到的是复杂性的竞赛和复杂性的增长。

当然复杂性增长问题是复杂的,进化在总体上走向结构功能复杂性增长的过程中,自然界和人工世界都存在着选择简单化的结构与功能,以及对复杂问题做简化处理。这是因为进化带来了复杂性增长,这要付出复杂性的成本代价:决策困难,更多样的功能带来协调困难,更多样的有序结构要素带来更多的自由能资源消耗,而且易出故障等等,因此,如果简化策略能解决进化问题,达到同样的目的,自然界和人工世界都会选择简化策略。科学技术革命中就有这样的例子。经开普勒改进的哥白尼日心说体系,用简单的行星绕日的椭圆轨道代替了托勒密体系描述太阳、月亮和五大行星的地心说中的79个本轮与均轮^①。飞机引擎用简单的喷飞发动机代替复杂的螺旋桨推动器就是简化策略、简化理论、或简化设计与装置被选择的实例。

但是在自然界的进化领域里,这种实例是很少的,因为自然界的进化是从简单的型构开始,去探索较复杂的型构。如果简单的解决能够有效,自然界在无数的试错中看来早已选上这种简化设计了。而且即使自然界没有发现这简化的设计,它已经发展为较为复杂的事物,要它返回这个简化设计,常常是积重难返。对于一个进化着的复杂系统,要取去它的一个元素比增加一个元素困难得多,因为取走其中一个元素对于相互依赖的复杂网络会造成根本的伤害,这就是为什么一些退化的器官(例如盲肠)会保留几亿年

^① 张华夏、杨维增:《自然科学发展史》,中山大学出版社1985年版,第85页。

的原因。

看来简化策略在进化过程中不占主导地位。进化的一般过程是,在进化过程中,自然界首先选择了较小的较适应环境的子系统,这些子系统在后继的发展中一般都不消失,进化以这些适应的子系统作为基础,然后在这里或在那里添加一些与之联系并不很强的系统,使之进一步适应变化的环境。从这个角度来看简化策略,它的作用只是使复杂性增长最小化。通过以上两节,我们已说明进化过程是复杂性增长的过程,简化过程就是简化这种增长。

也可能有这样一种情况:因为环境变得“简单”,系统向简化方向发展(或退化)。最明显的例子是病毒与其他寄生虫。作为最简单的寄生生物,病毒曾被认为是由较复杂的单细胞形式简化或退化而来。现在的理论则认为它是由宿主的DNA中的某一段落独立而发生。^①假定病毒真的是由某种复杂的有机体简化而成,这也只能说明进化只是局部存在着简化现象。一旦将它与它所寄生的宿主联系起来看,它与宿主组成的整体仍然是向着复杂性增加的方向进化。首先,寄生生物之所以能在一个相当稳定的宿主内环境下生存并进行“简化”,主要是因为宿主向着复杂性增长的方向发展,提高了它的内部功能与行为的必要多样性,从而对抗了外环境的各种干扰而得来。其次,从另一个角度来看,寄生生物本身造成了对宿主的干扰,这就诱发了宿主对抗干扰的行动,增加了宿主功能的复杂性。这种对抗会导致寄生生物与宿主的“军备竞赛”。它将提高双方的功能与行为的复杂性。如果这寄生生物是一种病毒或细菌,为了对付宿主的抗干扰的抗体,它必然要发展出突变的多样性,以逃避被抗体消灭。一旦它的突变多样性使它对抗体的必要多样性大于免疫系统的多样性时,免疫系统就趋于崩溃。这就是艾滋病病毒的情况,它的突变多样性使它的复杂性远远超过非突变性病毒。可见,进化发展仍然是朝着增加复杂性的方向进化的。

^① R. Dawkins (1976), *The Selfish Gene*. New York; Oxford University Press, p. 32.

第 7 章

混沌与动力系统

本章讨论动力系统理论,着重讨论非线性动力系统混沌。因此我们首先要有一个关于动力系统的大致定义。一个动力系统(dynamical system,又译为动态系统)可大致定义为具有运动的任何东西,宇观的有银河系的运动,微观的有电子、原子的运动,宏观的有钟摆的运动、球的跳动、化学反应、潮汐中的水流的运动、飞机的飞行等等。总之,一切随时间而变化的系统都可以看做是动力系统。研究动力系统就需要建立动态模型,建立动态模型时有两点必须加以注意:(1)选定变量。我们必须研究与确定是系统的什么东西,即什么变量随时间的变化而变化。例如在钟摆中是位置和速度随时间而变化。在化学反应中,可以从反应物的比例的变化来研究它,也可以从其中的某些物理方面如温度和粘度来研究它。对于经济系统,我们可以从人口的增长、国民生产总值的增长以及不可再生资源的消耗量和自然环境的污染程度这样一些变量来研究它,这些变量通常用 x, y, z 来描述。(2)确定规则集。我们必须研究与确定支配着系统怎样随时间的变化而变化的规则或规律。如果这些规则或规律是两个变量之间的关系,则记成 $y = f(x)$ 。当方程右边可用多项式表示,或展开为 x 的多项式时,若 x 含有高于一次幂的项,该方程叫做非线性方程。复杂系统理论研究动力系统,主要就是研究这种非线性动力系统。对于描述动态系统,科学家一般要建立一个数学模型来说明动力系统是怎样进行工作的,用以描述和解释动力系统的状态怎样随时间的变化而变化,以预言系统未来的行动。这时系统的状态用一组变量 x, y, z 来描述。时间划分为 $t_0, t_1, t_2, \dots$ 的序列,间隔为 Δt , 即 $t_n = n\Delta t$ 。如果变量只有一个,演化方程可记为 $x(t+1) = f(\mu, x(t))$, 这里 μ 为参量的集合。记 $x_0 \equiv x(t_0)$, 则演化方程为 $x_{n+1} = f(\mu, x_n)$ 。

大约距今 30 年前,科学家们相信,值得我们关心的自然界的运动或者是趋向固定点的运动,或者是周期性的运动,或者是准周期性的运动,或者还有随机的运动。前三者是决定论的,只要我们找到了它们的运动方程,测量确定了它的初始条件,就可以准确预言它们的行为;后者是非决定论的,但只要我们研究出它们的统计概率方程,我们不但可以理解它们的行为,而且尽管我们不能预测事件的出现,也可以预测它们发生的概率。但最近几十年科学家们发现,除了上面的几种运动形式之外,混沌的运动、混沌的系统在自然界和社会现象中不但存在,而且不是例外地存在,它是普遍存在于自然界之中,存在于水流与气流中,存在于行星的运动中,存在于全球的气象变化中,存在于大脑的活动中,存在于社会革命中,甚至存在于小孩的荡秋千中。这种运动尽管是决定论的,它的运动方程是确定性的而不包括随机项,但依据它,在混沌的区域中,系统的行为是不可预测的,而且原来划入随机运动的许多运动,也属于混沌。混沌的研究与复杂性的研究密切关联,是从总体上对复杂系统的研究。复杂系统的许多原理都是从研究混沌中得出的。我们在本书以后各章都会看到,生命与复杂系统是“混沌边缘的现象”。混沌理论为研究复杂系统提供了最典型的案例。没有这一章,复杂性和复杂系统是不能得到很好的理解的。诺贝尔奖获得者 H. 西蒙(他的中文名字叫做司马贺)有一本名著,叫做《人工科学》,1969 年出版了第 1 版。在 1996 年出版第 3 版时,补充了一章,叫做《复杂系统面面观》,提到了“人们近来对复杂性和复杂系统的兴趣猛增”,出现了“对复杂性的第二次、即当前的兴趣波……提供了关于复杂性的新思想方法……这些新观念的标签是‘突变’、‘混沌’、‘遗传算法’和‘元胞自动机’等。”^①元胞自动机在上一章中已经讨论过,本章着重讨论混沌或混沌动力学的基本原理。

本章的内容,虽然数学运用比较多,但借助于琼斯(J. D. Jones)的计算机运行教材(Run-time text book)的提示,只要熟悉高中的数学,便可以理解。^②

① 司马贺:《人工科学》,武夷山译,上海科技教育出版社 2004 年版,第 162 页。

② J. D. Jones. *Order: A Closer Look at Chaos*. September, 2005. 本章有许多例子和插图选自此书。

►► 7.1 叠代与吸引子

▷▷ 7.1.1 几个重要函数

在研究非线性动态系统时,有几种函数或几种方程特别值得我们注意:

1. 逻辑斯蒂方程

$$y = gx(1-x) \dots\dots\dots (7.1)$$

其中 x 的定义域为: $x \in [0,1]$, 参变量 g 的定义域为 $g \in (0,4)$ 。这个方程的用途广泛。例如,它可表示有限资源条件下的动物种群数或人口数的增长。其第一项 gx 表示每个时间间隔(例如每年)增长的倍数 g 。第二项 gx^2 表示因食物与空间的限制导致动物种群个体数量因饥饿、疾病、竞争而死亡的数量,所以是负数。在方程 7.1 中, x 是自变量, y 是因变量或函数。 g 为参变量(parameter), 英文全名为 gain, 表示增益的意思, 在无线电设置中表示电压或电流增加的倍数。在动物与人口中, g 也表示在一个计算期间它们增加的倍数。这个参量的变化, 在研究混沌学中有极为重大的意义。图 7.1 是该函数的几何表示, 是一条抛物线。图中间的对角线为线性方程 $y = x$ 的图形。Cursor Marked 为指针记号 x 的坐标值, 它的值为 $x = 0.75$, $y = 0.747$ 。图中 Cursor 为电脑鼠标指着的位置的那一点。($x = 0.997$, $y = 0.55$) 在图上没有标出来。在计算机的用语中, $*$ 表示乘的意思。

值得指出的是, 系统科学的创始人贝塔朗菲不仅从生物学中研究了这个方程, 而且从它的一般系统方程中推出了这个方程。^① 无独有偶, 混沌动力学也以这个方程为主要研究案例, 并在系统科学的发展中走出了决定性的一步。这就是我们马上要看到的, 从叠代的观点和方法上研究这个方程。

2. 正弦曲线函数: $y = g\sin(\pi x) \dots\dots\dots (7.2)$

π 为圆周率。按三角函数的性质, $\sin(\pi x)$ 的变化范围只在 -1 与 $+1$ 之间, 其图形如下(图 7.2):

3. 高斯函数: $y = ge^{-(x-1)^2} \dots\dots\dots (7.3)$

① L. 贝塔朗菲:《一般系统论》, 秋同、袁嘉新译, 社会科学文献出版社 1987 年版, 第 52 页

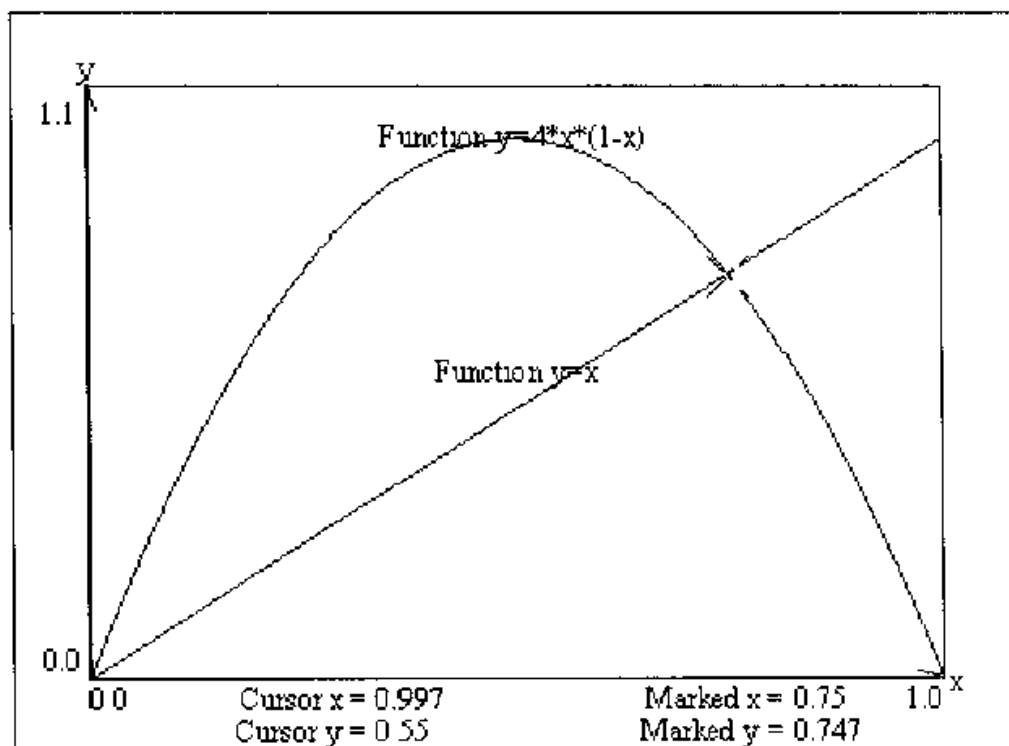


图 7.1 逻辑斯蒂曲线的图形

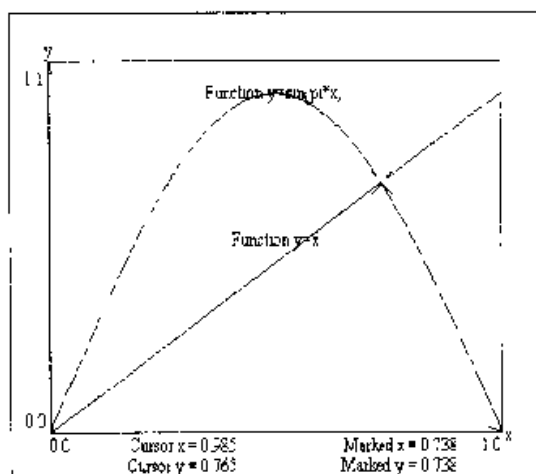


图 7.2 三角函数的图形

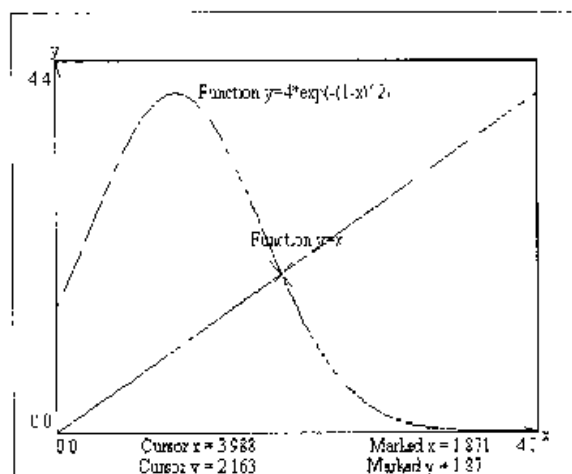


图 7.3 高斯函数的图形

这是一种可用于表示统计分布的钟形曲线,其图形如上(图 7.3)。

上述的图形中,图 7.1 与图 7.3 是按 $g = 4$ 而描出的。图 7.2 按 $g = 1$ 绘出。在图 7.3 中有一个符号($\wedge$)表示指数幂。例如 $x \wedge 2$ 表示 x^2 。图 7.3 中的函数 $\exp(\quad)$ 是指指数函数的意思。 $\exp(x)$ 表示 e^x 。 e 为自然数,其值为 2.7182818284……

▷▷ 7.1.2 叠代及其研究进路

给一张曲线图,例如给出 $y = x(10 - x)$ 的图。我们在习惯上是这样取点的,例如将 x 从 0 到 10 划分为 10 份,逐一地取 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{10}$ 各点,其中 $x_0 = 0, x_1 = 1, x_2 = 2, \dots, x_{n+1} = x_n + 1, \dots, x_{10} = 10$, 将对应的 $y_0, y_1, \dots, y_n, \dots, y_{10}$ 的值求得,然后连在一起得到曲线 $y = x(10 - x)$ 。现在我们要打破这个“理所当然”的习惯。我们可以有各种各样的取点方法。例如:(1)以 x 乘一固定数 a 来取下一点。即 $x_{n+1} = ax_n$ 。图 7.4 为 $x \times 1.25$ 取下一点。(2)以 x 除以一固定值 a 取下一点,即 $x_{n+1} = x_n / a$ (见图 7.5。这里 $x_{n+1} = x_n / 1.25$)。看这两幅图时请注意: * 表示乘的意思, / 表示除法。

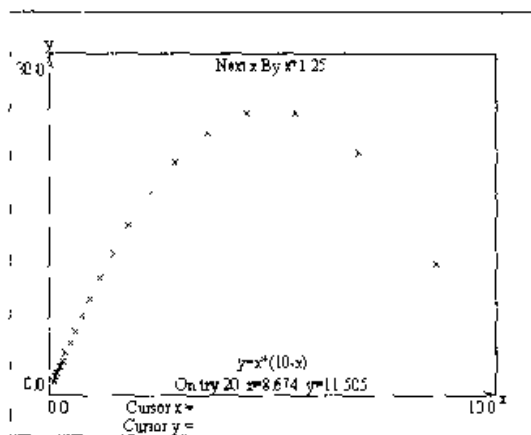


图 7.4 乘法取点

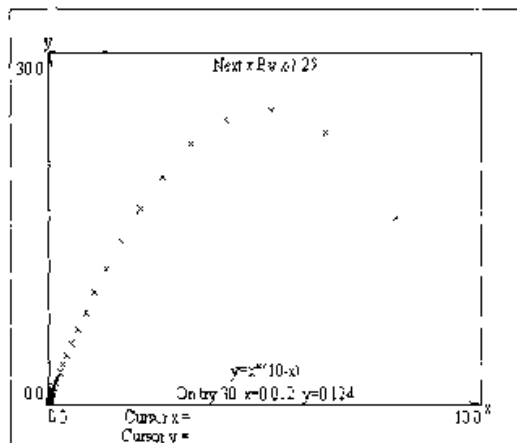


图 7.5 除法取点

(3)随机取点。例如用掷骰子得到的点数乘以 x 数取下一点(图 7.6)

(4)以 x 的某种函数来决定下一点,例如用 $1/x$ 来决定下一点,于是整幅图只有两个点,又例如在图 7.7 中,用 x_n 的下列函数 $x_{n+1} = \frac{1}{x_n + 0.1}$ 取点。请注意图 7.5 ~ 图 7.7 中,取点的结果不一定是下一点都在上一点的右边。破除这个惯例,我们才能很好理解叠代这个概念。

我们当然可以用 x 的各种函数来决定下一点的取法,但是最重要的一种取点方法就是以我们所要描绘的函数自身为取点函数来决定下一点取在那里:即以 $y = gx(1 - x)$ 为取点函数来从前一个点确定下一个点取在那里。于是我们便得到这样的一个取点的方程:

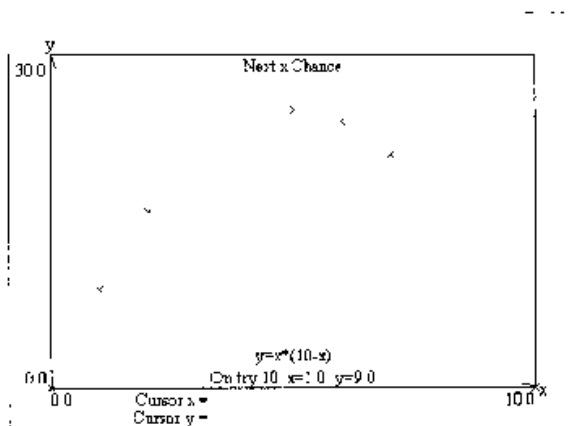
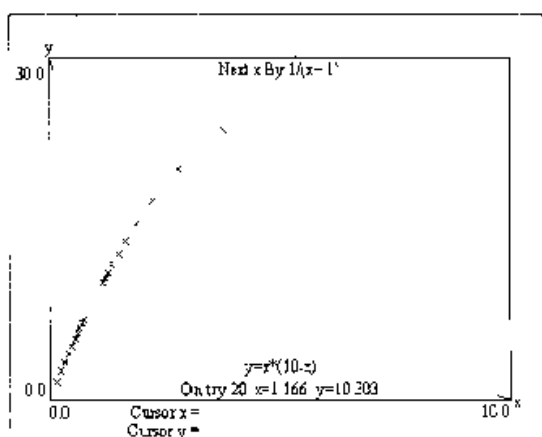


图 7.6 随机取点

图 7.7 用 x 的函数取点

$$x_{n+1} = gx_n(1 - x_n) \quad (7.4)$$

在这里,当确定第一个点 x_0 之后,代入(7.4)式的右边得到 x_1 ,再由 x_1 作为新变量代入公式(7.4)。这类方程,在数学上叫做叠代方程。叠代的英文原名为 Iteration,即“反复”之意,有时还有递归(Recursion)的含义;译成中文,还有反复代入同一个方程之意。函数本身可以看做是个黑箱,输入 x_0 ,得到输出 y_0 ,现在第 0 次叠代得出的 y_0 重新作为下一次输入的 x_1 ,即 $y_0 = x_1$ 可以看做是一个反馈。因此这样的绘图取点可以叫做通过反馈取点。图 7.8,图 7.9 揭示了这个通过叠代方程取点(即通过反馈取点)的点阵图。图 7.9 还揭示了当我们决定了方程的初始值 x_0 后,各叠代点的分布有什么特点,不同的初始值经同样方程的反复叠代后会有什么效应,这是研究叠代和叠代方程的第一个进路。它会导致我们后面将要说到的“混沌”以及“蝴蝶效应”。

研究叠代和叠代方程的第二个进路是:研究对于同一个函数,例如 $y = gx(1 - x)$,在确定了 g 之后,对于自变量的域值的所有的 x ,经一次、二次直至 n 次叠代后,最终的 y 值($y = x_n$)组成的曲线具有什么形状与行为。例如对于 $g < 3$ 来说, x_n 的曲线,0 次叠代为抛射线,一次叠代为马鞍形,二次叠代为两个马鞍形,最后会逼近一条直线。而在 $g \geq 3$ 的情况下,反复叠代形成的对于所有的 $x_0 \in [0, 1]$ 来说的 x_n 值的曲线,随着叠代的数目 i 的增加,会逼近不止一个而是两个或更多的极限值。图 7.8,图 7.9 展示了其中的两个情况。这就是吸引子问题。因为,当一个方程经无数次反复叠代时,它的 x, y 值反复地逼近或落入同一个点上。这将在下一小节 7.1.3

中进行研究。

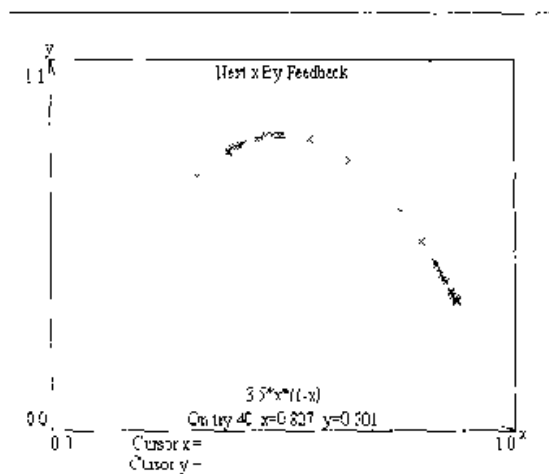


图 7.8

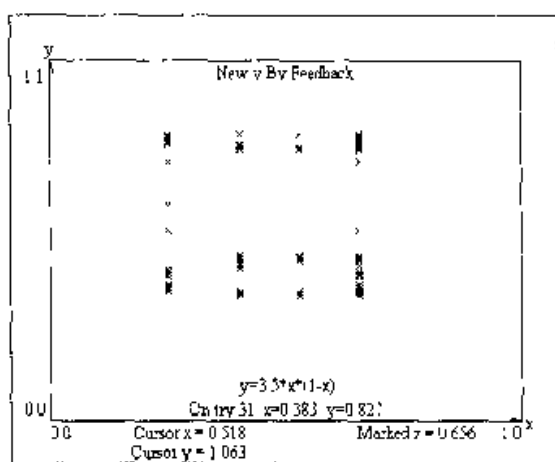


图 7.9

研究叠代和叠代方程的第三个进路就是改变参量 g , 考察随着叠代的增加, 叠代曲线的改变会发生什么情况, 特别是改变 g 到某一些临界点, 就会出现分叉和混沌的条件问题。这将在本章第 2 节中进行研究。

从系统科学的观点看, 叠代是什么意思? 它说的是, 对于某一个质点、一个事物或一个系统, 反复地运用同样的规律来支配它。而叠代研究的结果表明: 这个质点、这个事物或这个系统即使只受一些十分简单的规则支配和决定, 也会产生出十分复杂的甚至是混沌而不可预测的结果。叠代在生命世界中, 对应着繁殖; 在复杂系统中扩展到包含经济系统的增长、免疫系统抗体的增加、人脑中某些突触的加强以及系统中某种互相联结的形式的持续性等等。所以有人将系统的叠代看做与多样性和适应性并列的复杂系统行动者相互作用的三大特征之一。^① 这些饶有哲学意味和科学意味的问题, 就是从简单函数的叠代研究开始的。

▷▷ 7.1.3 吸引子

我们现在来研究对逻辑斯蒂方程 $x_{n+1} = gx_n(1 - x_n)$ 进行叠代会产生什么结果。我们刚才说过, 如果采取第二种进路研究叠代, 即固定参量 g 的值, 例如固定在 $g < 3$ 的某个值上, 对 $x \in [0, 1]$ 区间的所有值 (即所有的 x

① C. W. Flake; *The Computational Beauty of Nature*. 1998, MIT Press, p. 4.

点)进行叠代。叠代0次是个抛物物 $y_0 = gx_0(1 - x_0)$, 叠代1次是个马鞍形, 叠代2次是两个小马鞍。随着叠代次数 i 的增加, 我们看到叠代方程 $x_i = gx_{i-1}(1 - x_{i-1})$ 的曲线最后逼近一个极限值, 成为一条直线。当 g 略 ≥ 3 时, 我们看到的最终的曲线随 i 的增加会逼近二个或多于二个的极限值。这个被逼近的极限值就叫做吸引子。吸引子就好像有个东西有引力一样, 将 $y = gx(1 - x)$ 这个函数的函数值都吸引到那里去。就像一个碗装着一个弹子球, 无论弹子球从那个初值出发, 最后都要落到碗底一样。由于吸引子这个概念在系统科学中的重要性, 所以我们要研究逻辑斯蒂函数在什么情况下叠代会出现吸引子, 出现几种吸引子。

现在让我们创造一种几何方法来图示函数的叠代过程。我们前面说到, 所谓叠代就是将 x_0 这个初始值代入方程 $x_{n+1} = f(x_n)$, 例如代入方程 (7.4), 得到 $x_1 = gx_0(1 - x_0)$, 再将 x_1 代入公式 (7.4) 得 $x_2 = gx_1(1 - x_1)$, 如此类推, 得 $x_3, x_4, \dots$ 。现在我们在图上画一条等分角线 $y = x$, 设定一个初值 x_0 , 在 x 轴上作一条垂线与抛物线相交于一点 (x_0, y_0) , 由 (x_0, y_0) 作一条与 x 轴的平行线, 它与分角线交于一个点, 由于叠代中 $y_0 = x_1$, 所以这个点就是 (x_1, y) , 由此再作一条垂线与曲线相交的点, 就是 (x_1, y_1) 。这就完成了 x 的一次叠代和 y 的一次叠代, 叠代过程 $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \dots$ 以及 $y_0 \rightarrow y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \dots$ 的过程就可以由 $y = gx(1 - x)$ 的曲线与 $y = x$ 直线之间夹着的直角折线表现出来。有了这个叠代方程的几何模型之后, 函数是否趋向吸引子、趋向哪几种吸引子就比较直观了: 在这里只要看看曲线上的那个直角顶点一个个的走向便一目了然了。

下面我们分析方程 $x_{n+1} = gx_n(1 - x_n)$ 或 $y_n = gx_n(1 - x_n)$ 。

1. 当 $0 \leq g \leq 1$ 时, x_n 与 y_n 趋于一个不动点 $\xi = 0$ 。因为 g 小于 1 时, 所有的 y 值都小于它对应的 x 值, 即 $y_n < x_n$, 故曲线只能在 $y = x$ 的分角线下面, 与它相交于 0 点。这就逼使系统稳定在 0 点, 它也就是吸引子, 不过是一种固定点吸引子。

2. 当 $1 < g \leq 3$ 时, 0 点变得不稳定, 而趋向另一个稳定点。不论初值 x_0 在何处取值, 经若干次叠代后, 它逼近另一个稳定不动点 ε 。即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim y_n = \varepsilon$ 。将 ε 代入 $y_n = gx_n(1 - x_n)$, 得 $\varepsilon = 1 - \frac{1}{g}$ 。这就是曲线与 $y = x$ 直线的交点。见图 7.10。在直角折线最密集的地方, 就是吸引子, 它同样

是固定点吸引子。图 7.10 的 g 为 0.629。图上方写着的 $\text{base } i = 0$, 表示方程的叠代从第 0 次开始, $i \text{ steps} = 9$ 表示图 7.10 为叠代了 9 次的图。第 (2) 种情况的解, 叫做周期 1 的解。

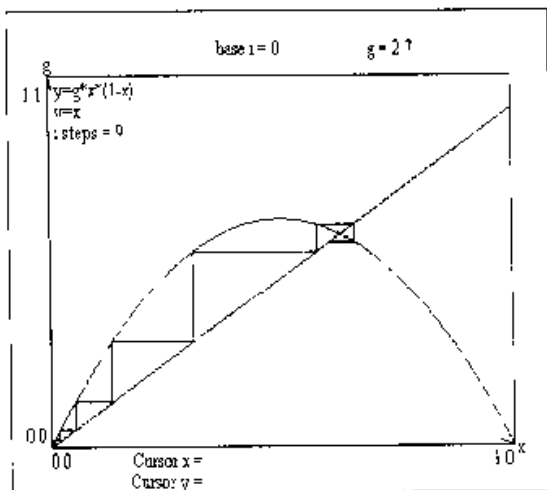


图 7.10 周期 1 解与固定点吸引子

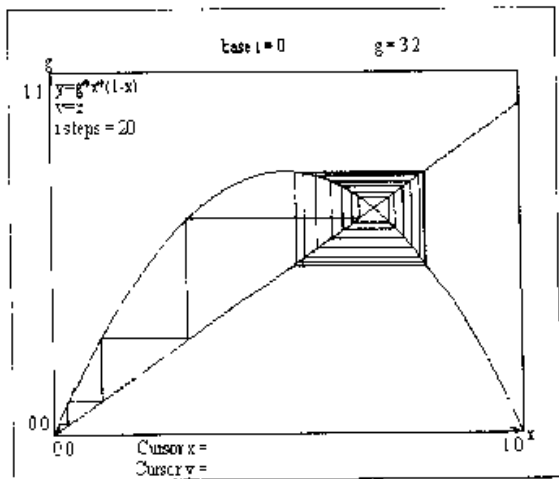


图 7.11 周期 2 解和两吸引子

当 $3.3 < g \leq 1 + \sqrt{6}$ 时, 上述的不动点又变得不稳定。随着叠代数目 i 的增加, 函数 y_n 交替地趋向两个吸引子, 即在两个值 $\varepsilon_1 = g\varepsilon_1(1 - \varepsilon_1)$ 和 $\varepsilon_2 = g\varepsilon_2(1 - \varepsilon_2)$ 之间来回振荡。这叫做周期 2 的解。例如, 当 $g = 3.2$ 时, x_n 趋向在 0.513 和 0.799 两个值上来回跳动, 见图 7.11。如 x_n 在 0.513 处, 则 x_{n+1} 在 0.799 处。

4. 当 $3.449 < g \leq 3.545$ 时, 周期 2 的两个值又不稳定, 此时 x_n 在四个值上来回跳动, 这叫周期 4 的解。例如, 当 $g = 3.5$ 时, x_n 趋向于 $0.383 \rightarrow 0.824 \rightarrow 0.496 \rightarrow 0.873 \rightarrow 0.383$ 。这种情况, 可见诸于图 7.12。

随着 g 变大, 这个过程不断加速进行。从分叉的观点看, 这是一个不断“一分为二”的过程: 周期 1 不稳定分叉出周期 2, 周期 2 不稳定分叉出周期 4, 周期 4 不稳定分叉出周期 8……见图 7.13。从吸引子的观点看, 这是吸引子不断分裂的过程。图 7.13 已经看出有无数的吸引子。如果要使分裂减少, g 必须增加得很慢很慢。这就使得 g 在 3.5 至 3.6 之间就包含了无限数的吸引子分裂。倍周期分叉是无限的, 但 g 却有一个极限值: $g_\infty = 3.5659945672 \dots$ 这里 g 的下标表示分裂的次数, 在 g_∞ 处, 系统叠代方程的定态解为 2^∞ 。周期的 ∞ 即没有周期。从 $g > g_\infty$ 开始, 这类裂断

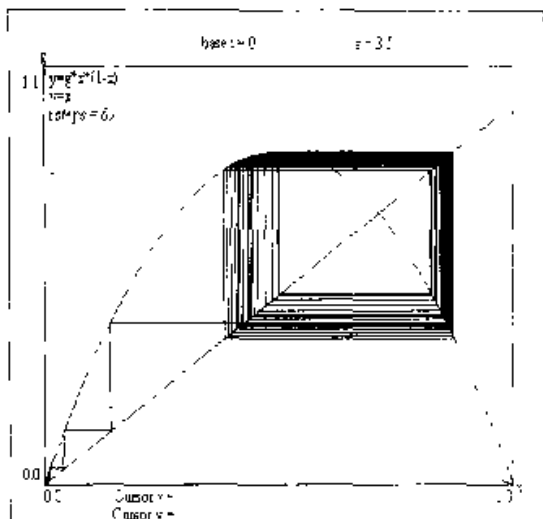


图 7.12 周期4解和多个吸引子

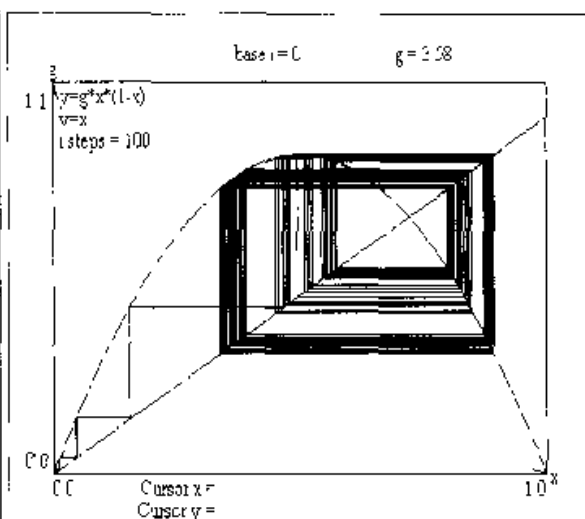


图 7.13 混沌解和混沌吸引子

成为无穷个吸引子称为混沌吸引子。产生混沌吸引子的区域叫做混沌区。这时 x_n 值跳到什么地方是没有模型可寻的。下一个叠代在何处发生也是无法预测的,尽管下一个叠代是完全由叠代方程及其几何决定的。混沌是决定论的,又是不可预测的。这就是混沌悖论,是一个很重要的哲学问题。

以上的分析用动力系统模型向我们表明:吸引子是某种函数叠代进展的方向和结局,也是一般复杂系统状态变化的方向和结局。复杂系统从某种状态开始变化发展,它最终会达到某种吸引子,即它所偏好的状态。如果没有别的因素向它施加作用,它会保持在那个状态中。这个吸引子的状态可以是一个点,如球滚到谷底中不动;可以是一个有规则的轨道,如行星绕自己的轨道运行;可以是复杂状态的系列,它用许多个吸引子组成的系列来表示,如细胞新陈代谢所展示的情况那样;还可以是一个无限的系列,它就是混沌的状态和混沌吸引子或奇异吸引子。凡导向吸引子的状态空间的领域被称为吸引子的盘。吸引子盘所占据的状态空间容积与吸引子所占据的状态空间容积之比可以看做是自组织程度的一种度量。在系统中,形成一种结构和保持一种结构(保持系统的稳定性)都可以被称为陷入一个吸引子中,这就是从系统动力学的观点解释了本书3.4中关于系统的稳定性的研究,在那里只有一个惟象的说明,而这里却能给出一个数学模型的解释。在复杂系统的演化中,常有许多吸引子,并且这些吸引子会随系统内部或外部、或内外之间的相互作用的变化而变化,在模型中叫

做吸引子随参量的变化而变化,而在现实世界中这就是突变。研究自组织也就等价于研究系统的吸引子,研究它的形式与动力学机理。因此在以后各章有关自组织和复杂系统的研究中,读者应注意从吸引子方面来对它进行理解。

7.2 相控图、分叉与层叠

7.2.1 相控图

我们以上所绘出的逻辑斯蒂函数是以自变量 x 为横坐标、以函数 y 为纵坐标来观察 y 有什么变化,从而形成什么图形。接着在这个抛物线上,我们改变参变量 g ,发现抛物线的高度(振幅)随 g 的减小而减少;更重要的是随着 g 的改变,函数叠代所趋向的吸引子不同。因此 g 参量就成为控制吸引子变化的控制参量。用改变 g 来研究吸引子是研究吸引子的重要方法,因此我们现在要建立一个坐标系平面,将 x 固定在一个数字($x = a$)上,以 g 为横坐标,以函数 y 的值为纵坐标,观察叠代是否趋向吸引子,趋向哪样的吸引子。在动力学中,变量的状态称为相,表现状态所需的维数所构成的空间称为相空间。现在我们用一维来表示动点 (a, y) 的相,用 g 表示另一维。这样表示的空间叫相控空间(phase-control space),这空间上的图叫相控图(phase-control map)。

现在,我们用相控图来研究函数 $y = gx(1-x)$ 在多次叠代后在相控图中呈现的趋向。现在我们先用品式将各次叠代的函数式写出来:

第 0 次叠代: $y_0 = gx_0(1-x_0)$ 。因按叠代的性质 $x_{n+1} = y_n$, 故

$$\begin{aligned} \text{第一次叠代: } y_1 &= gx_1(1-x_1) \\ &= g \times g(x_0(1-x_0)) \times (1-(g(x_0(1-x_0)))) \\ &= (x_0 - x_0^2)g^2 - (x_0 - x_0^2)^2 g^3 \end{aligned}$$

令 $\mu = (x_0 - x_0^2)$ 则

$$y_1 = \mu g^2 - \mu^2 g^3$$

$$\text{第二次叠代: } y_2 = \mu g^3 - \mu^2 g^4 - \mu^2 g^5 + 2\mu^3 g^6 - \mu^4 g^7$$

更高次的叠代愈来愈复杂,可以称之为复杂性爆炸(explosion of complexity),无法找到一般的表达式,但从其趋向可看出:

第 n 次叠代: $y_n = \mu g^{n+1} \dots \mu^{2n} g^{2n+n-1} \dots$ (7.5)

我们现在固定 $x=0.5$, 看看 y_n 与 g 的关系。

第 0 次叠代的图形是 7.14, 一条直线。第一次叠代的图形是 7.15, 第二次叠代的图形是 7.16, 第三次叠代的图形是 7.17。随着 n 的增加, y_n 的图形在 g 的高值成锯齿状。 n 更高, 图形完全迷失了方向。相控图还显出另外一个特点: 叠代一次有一条曲线在 g 的高端朝上, 再叠代一次就在 g 的高端曲线朝下。把前面几次叠代的图叠加起来, 我们在图 7.18 得到了一个图形, 已经可以看出吸引子在性质上发生变化的苗头。到叠代了 10 次, 吸引子变化的图形已经明显。

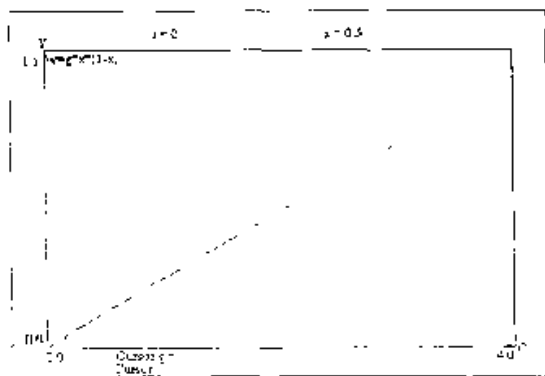


图 7.14

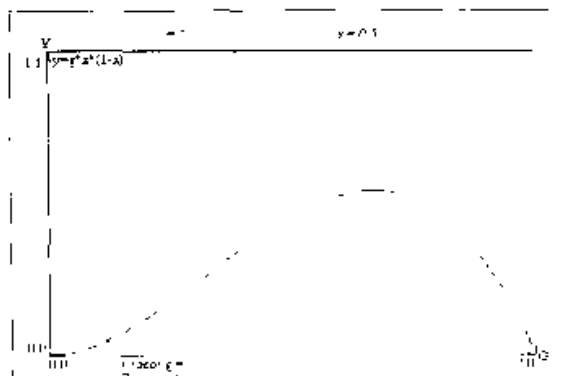


图 7.15

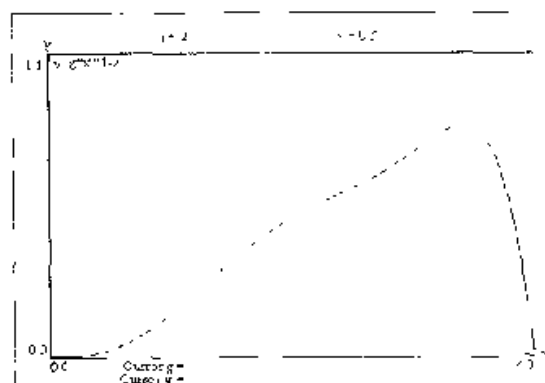


图 7.16

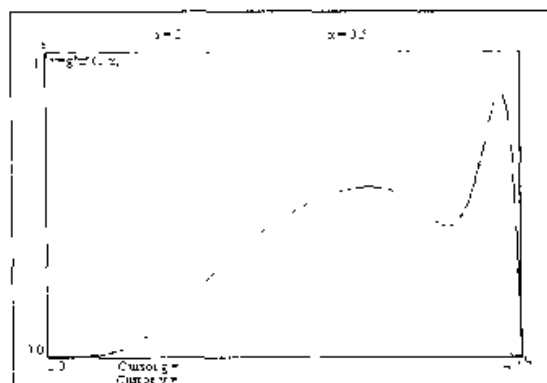


图 7.17

▷▷ 7.2.2 分叉与层叠

有了相控图, 我们便可以用它重新注释 7.1.3 中有关吸引子的种类及

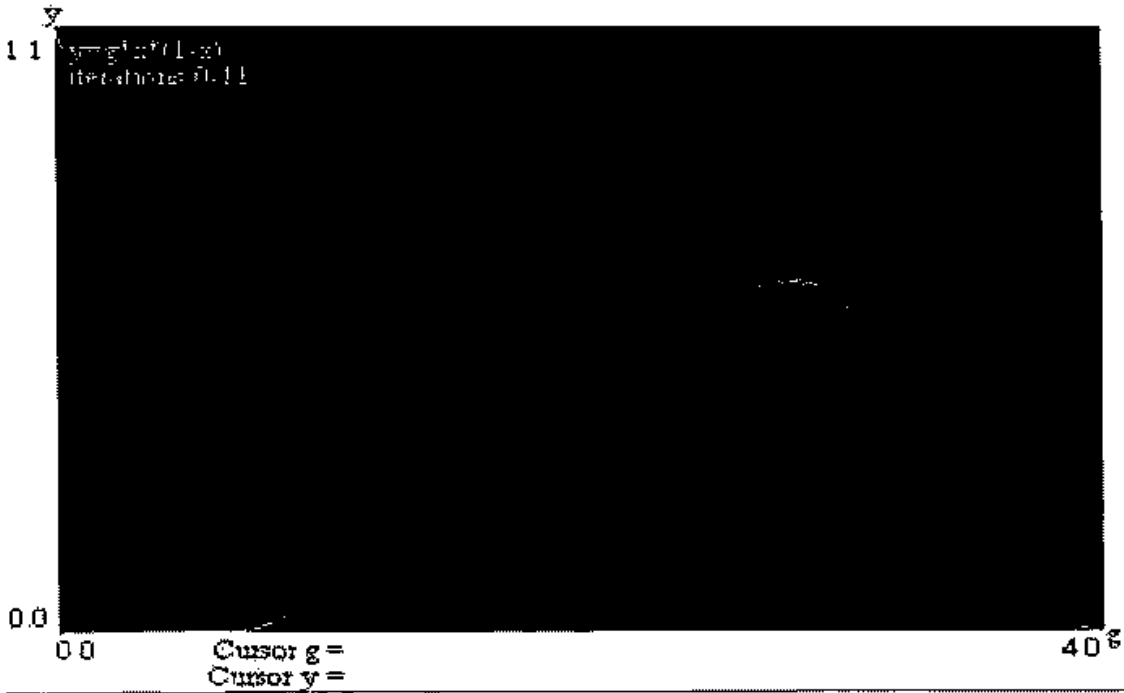


图 7.18

其性质随 g 的变化而变化。在 7.1.3 中,我们用 $y = f(x)$ 的曲线与 $y = x$ 的直线夹着的折线来表现叠代趋向的吸引子。在那里吸引子表现为抛物线上的一个每次叠代都逼近的点,现在,在相控图中,吸引子表现为一条线,它被称为二维吸引子。现在我们将叠代 1000 次以下做出的线删去,从叠代的第 1000 次开始分析。那时 $y_{1000} = g^{x_0}(1 - x_0)$ 的曲线已逼近吸引子。所以这条线是吸引子线。(见图 7.19)

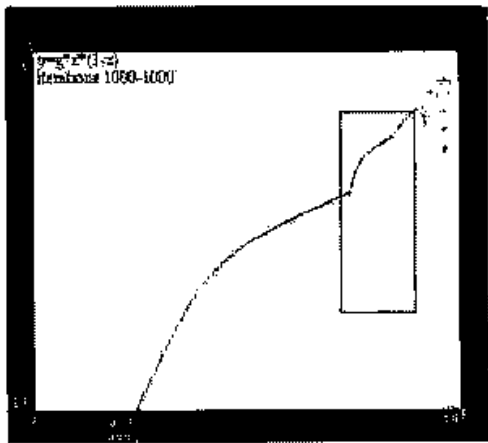


图 7.19

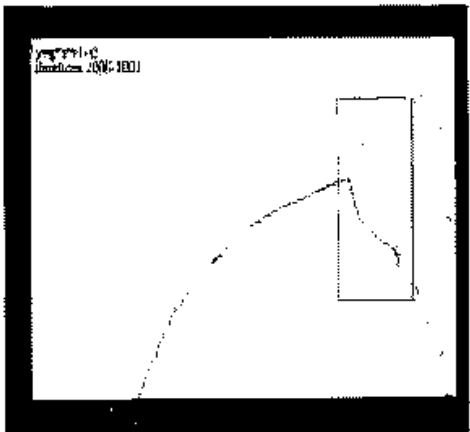


图 7.20

图 7.19 的吸引子线是一波四折,展示了四种吸引子区

1. 0 点吸引子区:第一个折点为 1,在 $0 \leq g \leq 1$ 处。方程(7.5)随 g 的幂的不断增大, y_n 的值显然趋于 0,所以吸引子为 0。

2. 单值吸引子区:第二个折点为 3,在 $1 \leq g \leq 3$ 处,是一条平滑曲线在这个 g 域里,再叠加 $n = 1001$ 次以上,即使叠加到 $n \rightarrow \infty$,都落到这条平滑曲线上代表单一个吸引子。

3. 周期吸引子区:越过第二折点 3,即 $3 < g \leq 4$ 的领域里,叠代的 $n = 1000$ 次和 $n = 1001$ 次之间就有很大的区别。 $n = 1000$ 是上边一条曲线, $n = 1001$ 是下边的一条曲线(图 7.20)。以后各次的叠代,这条吸引子线反复地上下振荡。

这个 $g = 3$ 的点就是一个临界分叉点,这个 $g > 3$ 的分叉,叫做吸引子的裂变或吸引子的分裂。这时再向前叠代,偶数次叠代,落入上面一个分支,奇数次叠代,落入下面一个分支。

g 在 2.99 至 3.6 之间,吸引子不断发生裂变,1 分为 2,2 分为 4,4 分为 8,并很快达到无限。这时 $g_\infty = 3.565994 \dots$ 这个过程被称为分叉层叠(cascade of bifurcations)。分叉层叠有一种规律性,就是设第一个分叉点 g 的值和第二个分叉点 g 的値之差为一个间隔,则邻近两个间隔之比为一常数。图 7.21(a)的分叉表展示了 8 个分叉之间的 7 个间隔,邻近两个间隔之比均为 4.7。(见图 7.21)

4. 混沌吸引子区,当 $g_\infty \leq g \leq 4$,系统进入混沌区。混沌区的基本特征就是在这个区域里,不存在一种模型或方法从现时的叠代中去预言下一次叠代的结果会落在哪里,但这并不意味着它是完全随机的,因为它到底落到哪里,完全由叠代方程决定。而叠代方程是一个决定论的或确定性的方程,在这方程中不包含随机的或概率性的项。同时,这里混沌吸引子的区域也并不表示完全无序,在混沌中有无数个“有序之窗”(window of order)。

▷▷ 7.2.3 混沌区域中的有序之窗

当仔细观察和探索逻辑斯蒂函数吸引子混沌区域的结构时,我们发现混在这个混沌区中有许多貌似空白的条条。其实它就是混沌中或混沌区中的有序窗口。图 7.22 用白色的矩形框框住的就是这种有序窗口。在这些窗口中都存在前面所说的分叉层叠。在这里我们可以看出,在混沌窗口的

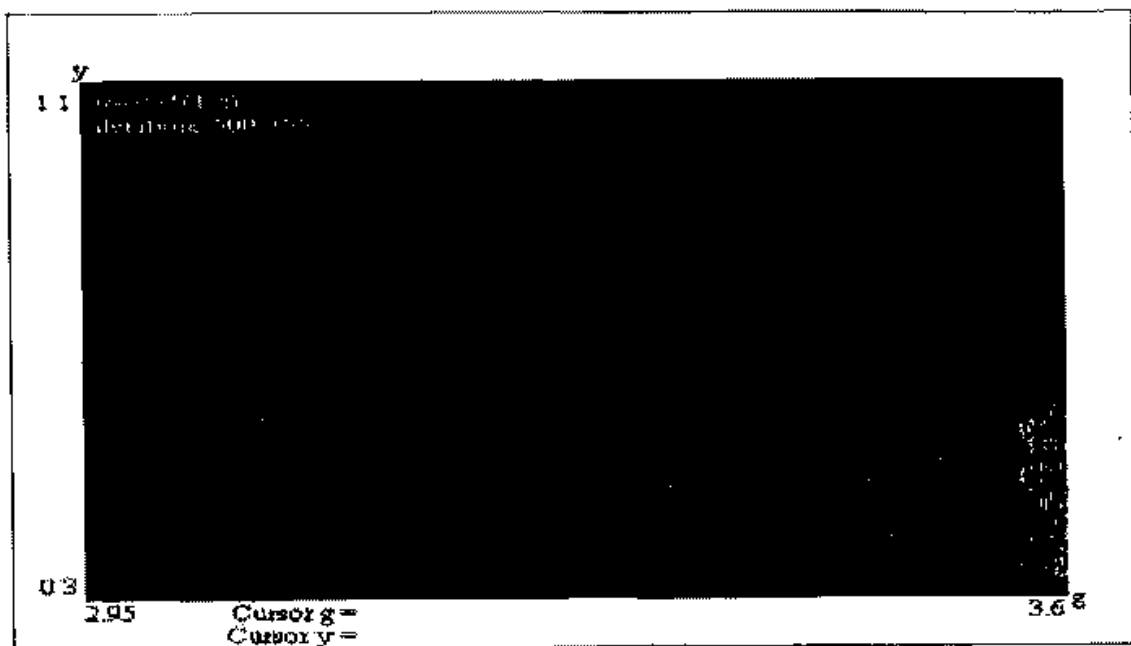


图 7.21(a)

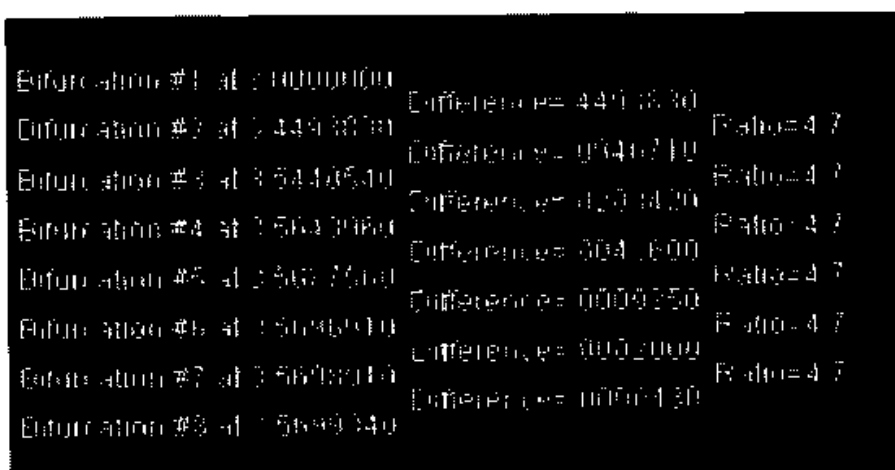


图 7.23(b)

边缘上,突然产生了一个吸引子,它从混沌行为的塌缩(collapse)中产生,然后经过分叉与层叠又返回混沌中去。这是一个神秘之窗,让我们窥见宇宙与人生的旅程,它们从混沌中来又返回混沌中去。奇怪的是在混沌区中有无数有序之窗,就如同在每一瀑布层叠中有无数分叉一样,而每一有序之窗中吸引子都有一个特征性的周期。

现在让我们抽出一个有序之窗来说明有序之窗的分叉层叠。首先,我们来检查相控图 7.22,它是 $g = 3.4 \sim g = 4.0$ 之间的相控图,然后将那个白色矩形窗口加以放大,放大为图 7.23,其区间为 $g = 3.73 \sim 3.753$ 。在

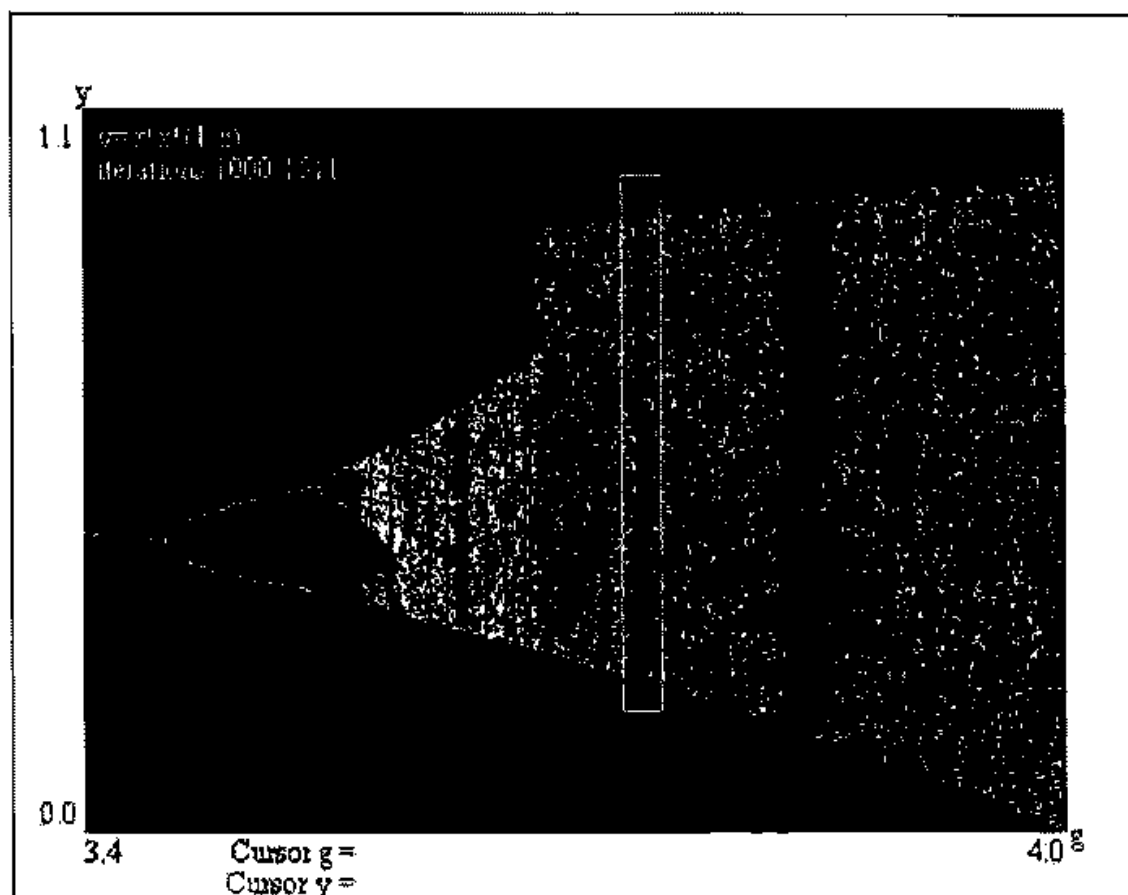


图 7.21

图 7.23 中, 我们又以白色矩形框将那个小的分叉层叠框起来, 再将它放大为图 7.24。图 7.24 的矩形方框, 正好框住了带周期 5 的吸引子。请注意, 图 7.24 的二维吸引子的分叉层叠与其出发点图 7.22 或 7.21 的分叉层叠, 非常相似。这种自相似 (self-similarity) 虽然不是完全相同, 但足以说明混沌是从有序经层叠突现出来的, 而混沌的发展又生出许多有序的东西。关于这种自相似性, 就是分形几何的第一特征。有关讨论见 7.3.1。

现在我们又给出一张分叉层叠表, 其间隔及比率展示于图 7.25, 这些分叉层叠收敛于同一比率。如图 7.21 所示的那样:

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g_n - g_{n-1}}{g_{n+1} - g_n} = 4.669201660910299 \dots \quad (1)$$

为什么逻辑斯蒂函数的二维吸引子分裂会有这样的几何规律呢? 为什

(1) 刘式达, 刘式适编著:《非线性动力学和复杂现象》, 气象出版社 1989 年版, 第 144 页。

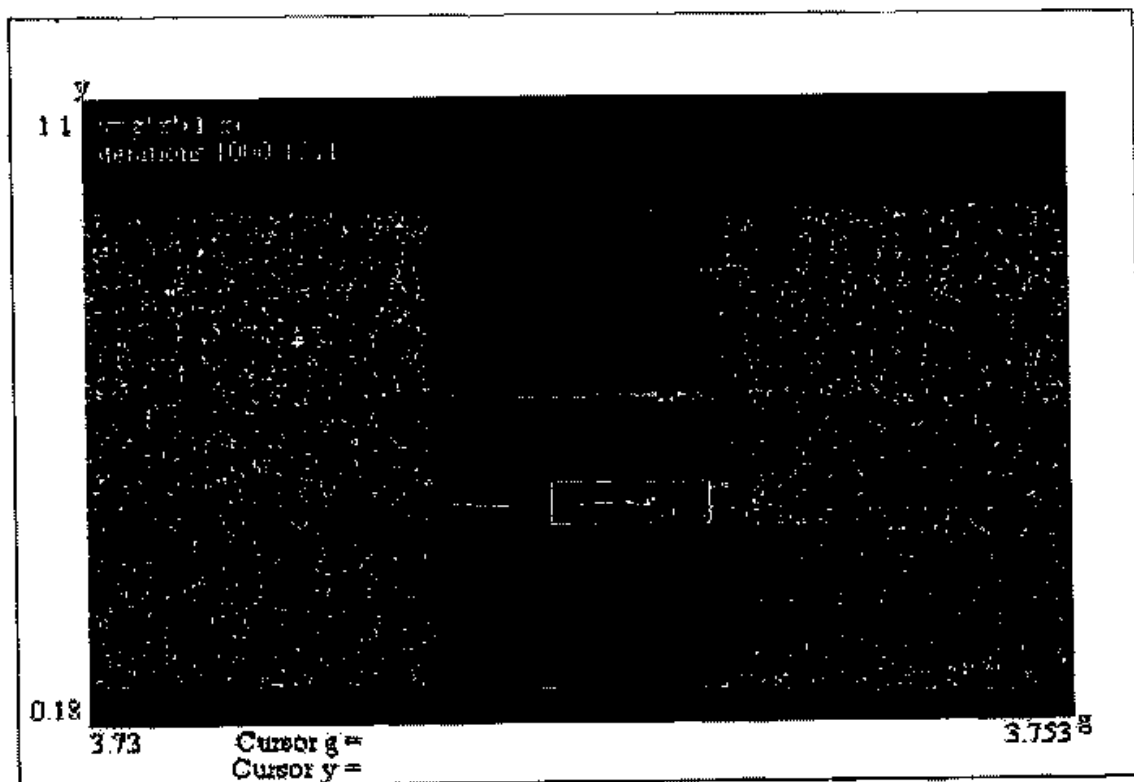


图 7.23

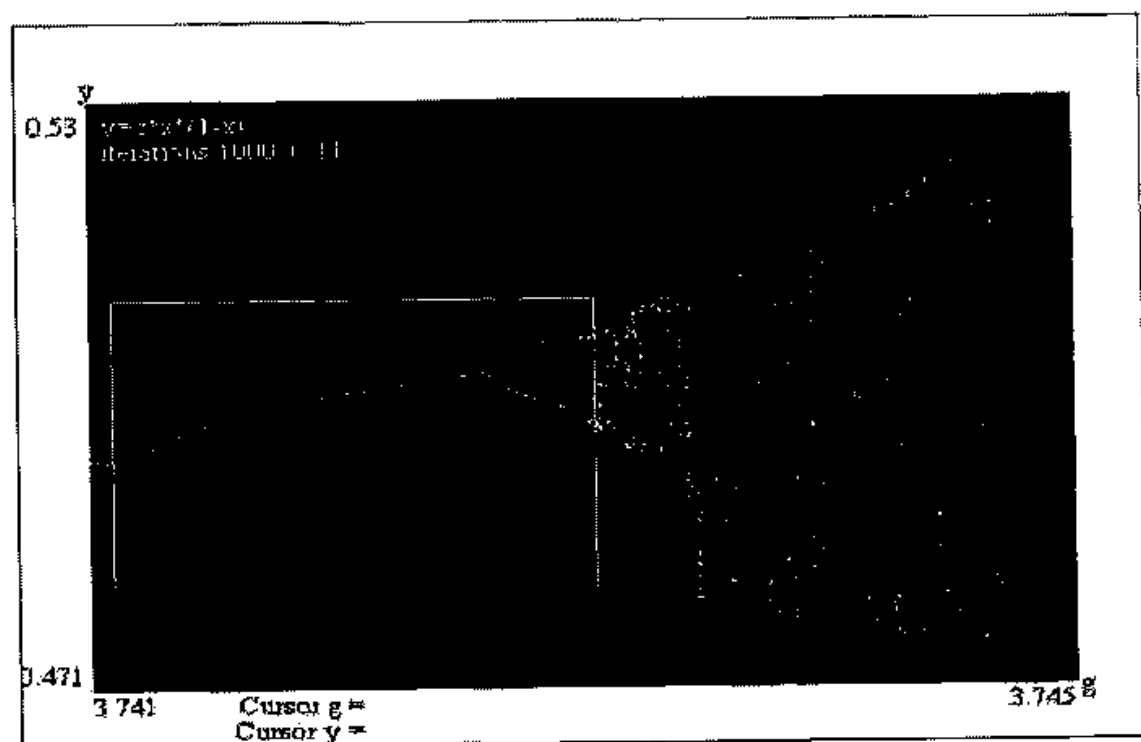


图 7.24

么这个函数的吸引子分裂以及如此精确的结构会接受这个指令？要证明它

都来自逻辑斯蒂函数的反复叠代,并非一件容易的事。不过美国新泽西洲爱迪生学院 J. 琼斯(J. D. Jones)教授和核工程师在他的计算机运行教材《序——对混沌的靠近观察》一书中却说了这样的话:“总而言之,逻辑斯蒂函数包括了我们从一开始就具有的智慧,我们所做的一切都不过是反复叠代而已。”^①

关于吸引子的分叉层叠,早在 1958——1963 年芬兰数学家麦博格(P. J. Myrberg)就对这些序列进行了研究。美国物理学家费根鲍姆(M. J. Feigenbaum)发现了这个 δ 常数,所以物理学家和数学家称它为费根鲍姆常数。费根鲍姆说:“逻辑斯蒂函数吸引子的规律性及其无限多样性具有极为深刻的意义。也许建立像行星与动物这样复杂结构的指令可以表达为某些相对简单函数的反复叠代的结果”^②。

有个非常奇怪的现象是,当我们检查非常不同的函数时,例如正弦曲线函数 $y = g \sin(\pi x)$,其叠代的结果基本上与逻辑斯蒂函数这种多项式函数的叠代结果相同,至于高斯函数 $y = ge^{-(x-1)^2}$ (见图 7.26(a))其叠代结果在许多 g 的区间里出现很大的区别,例如在 $g = 3.592$ 到 $g = 3.621$ 的区间里从混沌到有序再到混沌,出现的并不是分叉层叠,而是反向分叉(unbifurcation),当 g 经过混沌在 $g = 3.6$ 附近,随着 g 的增加,首先出现周期性吸引子,从周期 128 再缩成为 64,到 32,到 16,到 8,到 4,再到 2 和 1。而这个单值吸引子即时再进入混沌,见图 7.26(b)。

但是这个函数的叠代,只要出现分叉层叠,其规则就与其他函数的分叉层叠的规则完全相同。请看高斯函数在 $g = 1.558 - 2.188$ 的 8 个分叉和 7 个间隔的 6 种比率的情况。见图 7.26(a),它的费根鲍姆常数与其他函数曲线叠代的结果完全一样,可见吸引子规律与结构和产生它的函数完全无关,它是“普适性”(universality)的。这个吸引子规律普适性的概念是混沌科学的核心,是特别值得哲学与科学重视的一个问题。

① J. D. Jones: *Order - A Closer Look at Chaos*. (run-time book) 2005. <http://www.mcasco.Com/bifurcat.html>. p.12.

② 转引自 J. D. Jones. 2005. 同上页。

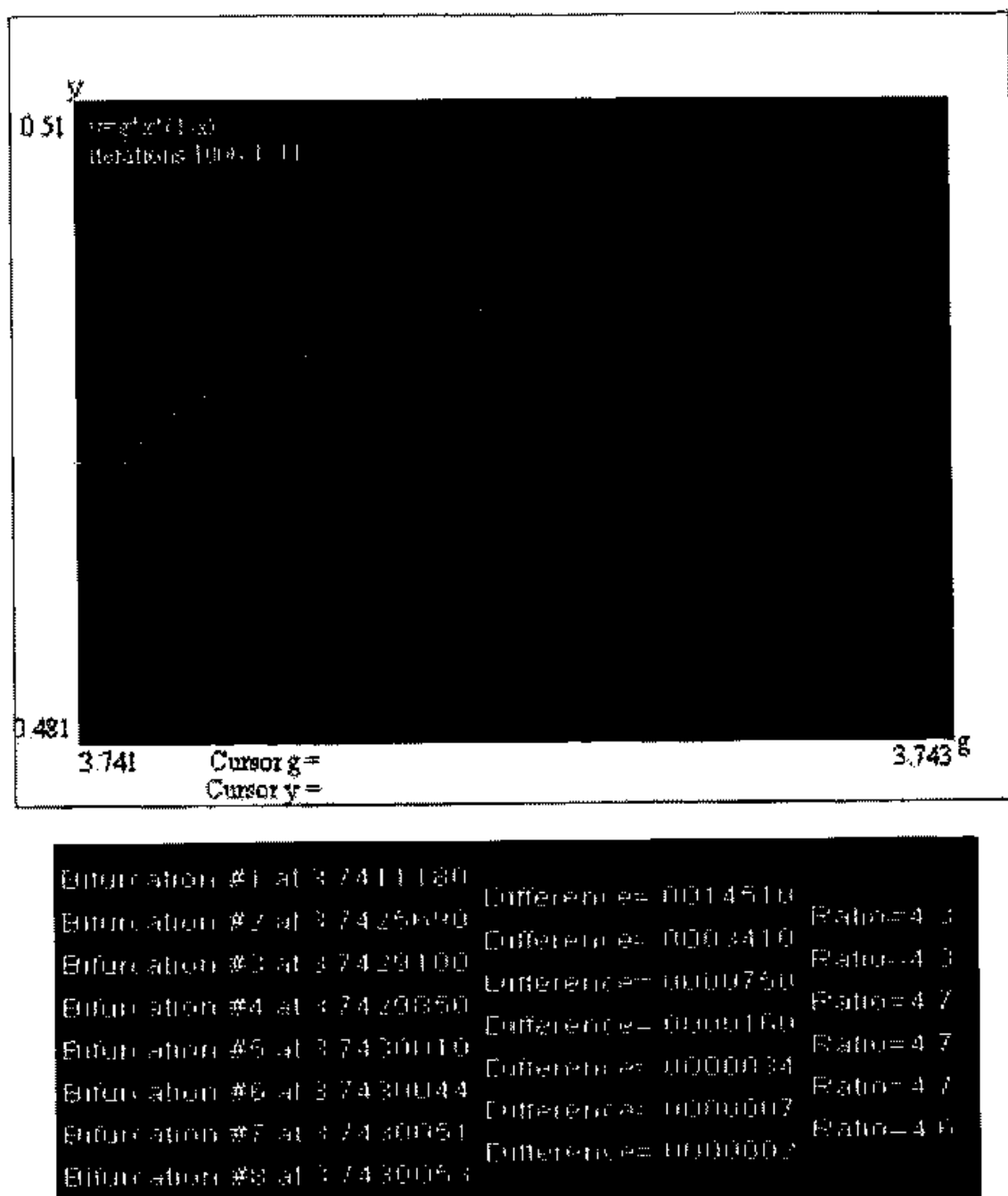


图 7.25

►► 7.3 分形

►► 7.3.1 自然界的复杂形状与分数维

大多数的人工客体在几何上是简单的,它模拟了有智能的人的理想几

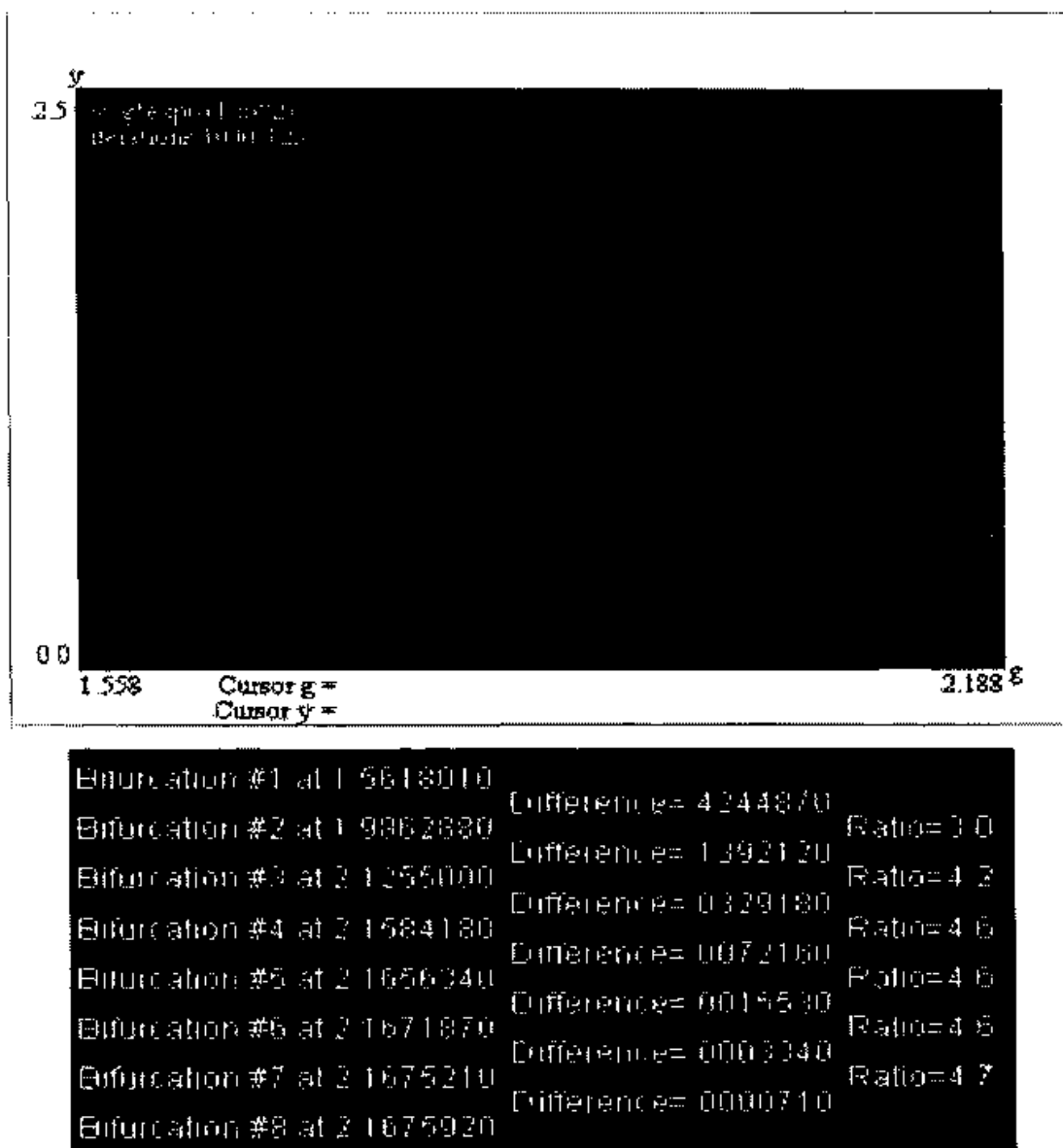


图 7.26(a)

何概念和几何形状,于是就有直线、平面、立方体、圆周以及圆柱形等等,这些人工产品成为理性生命的标志。假定我们做星际旅行到了别的星球,发现了上述这些形状的物品,我们就确认这里肯定有外星人居住着。这种情况使古希腊的伟大数学家和哲学家柏拉图陷入幻想,以为只有这些规整的几何形状才是真实的,有意义的。他说:“世间的现实的直线和圆是不重要的,而只有直线和圆的永恒理念才是值得哲学沉思的。”也就是说,自然客体与简单的几何理念是不一致的。例如蕨草、树木、雪花、椰菜花以及山川的形状,甚至整个银河系,它们的形状比欧氏的几何理念复杂得多,传统几何学表达不了它们,就把它当做一些近似的东西和例外的东西排斥在外。

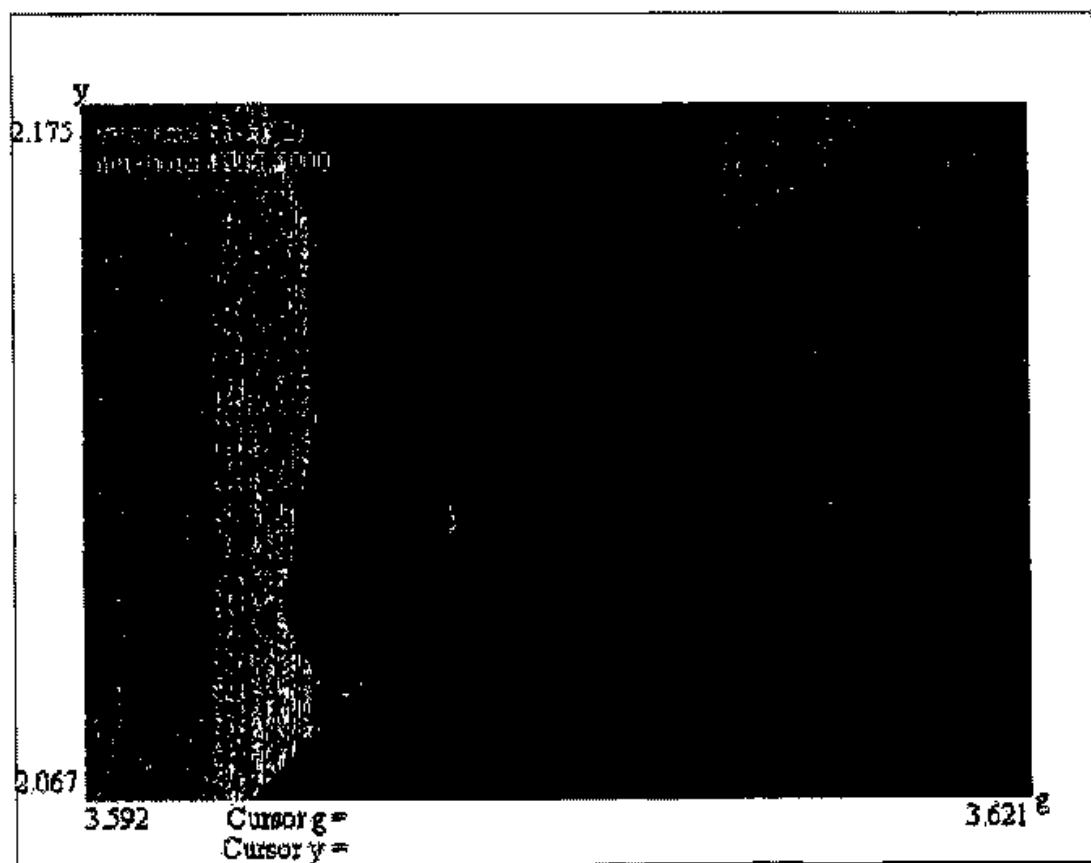


图 7.26(b)

但是 20 世纪的分形几何学(fractal geometry)却要把一些更接近于自然界形状的复杂几何形状重新找回来作为研究对象,对它们进行理念的、哲学的沉思。它的创始人就是耶鲁大学数学教授 B. B. 蒙德布罗(Benoit Mandelbrot 1924—)。

分形几何学有两大特点,第一就是自相似性(self-similarity),即这些图形的部分类似于它的整体,小尺度的形状类似于大尺度的形状。其所以如此,主要是因为它是通过自然界的同样规律的反复作用或数学函数在计算机中的叠代运作而形成的。第二,这种几何形状所具有的维度是分数维而不是整数维。在本节中,我们将首先讨论第二个问题,下一节我们将着重讨论第一个问题。在讨论这个问题之前,我们先介绍几个例子。

例 1. 康托集问题。

康托集问题是希尔伯特于 1900 年提出的著名的 25 个数学问题中的第一个问题,即实数系和数轴的性质问题有关。

取单位线段 $[0,1]$ 做三等分之后,去掉中段,即去掉开区间 $(1/3, 2/3)$;



蒙德布罗 (Benoit Mandelbrot 1924—)

再将留下的二线段也如法炮制,三等分并去掉中段,……如此无限地划分和取舍,所留下的实数的子集就称为康托集合 (Cantor set), 又称为康托微尘 (Cantor's Dust)。其图形如下 (见图 7.27):

乍看起来,我们好像取走了一切,而什么也没有留下,因为我们取走的线段总和是:

$$\frac{1}{3} + \frac{2}{9} + \frac{4}{27} + \frac{8}{81} + \cdots = \frac{1}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{3^n} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1 - \frac{2}{3}} \right) = 1$$

留下来的康托点集的宽度为 0。

可是,它却包含了无穷的“点”: $0, 1, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{7}{9}, \frac{8}{9}, \frac{1}{27}, \cdots$, 作为它进一步划分的端点。问题在于,康托集不仅包含无限的点,而且包含了一个比分散的点更多的“域”。关于这一点,只要我们用三进制而不是我们常用的 10 进制将它表达出来,就很清楚了。所谓十进制计数法就是有 10 个数符, $0, 1, 2, \cdots, 9$, 逢 10 进 1, 而所谓三进制计数法就是只有 3 个数符: $0, 1, 2$, 逢 3 进 1。例如十进制中的 4, 等于三进制中的 11, 即 $(4)_{10} = (11)_3$ 。于是 $(1/3)_{10} = (0.1)_3$, $(2/3)_{10} = (0.2)_3$, $(1/9)_{10} = (0.01)_3$, $(2/9)_{10} = (0.02)_3$, $(7/9)_{10} = (0.21)_3$, $(8/9)_{10} = (0.22)_3$, 等等。参看图 7.27 中的

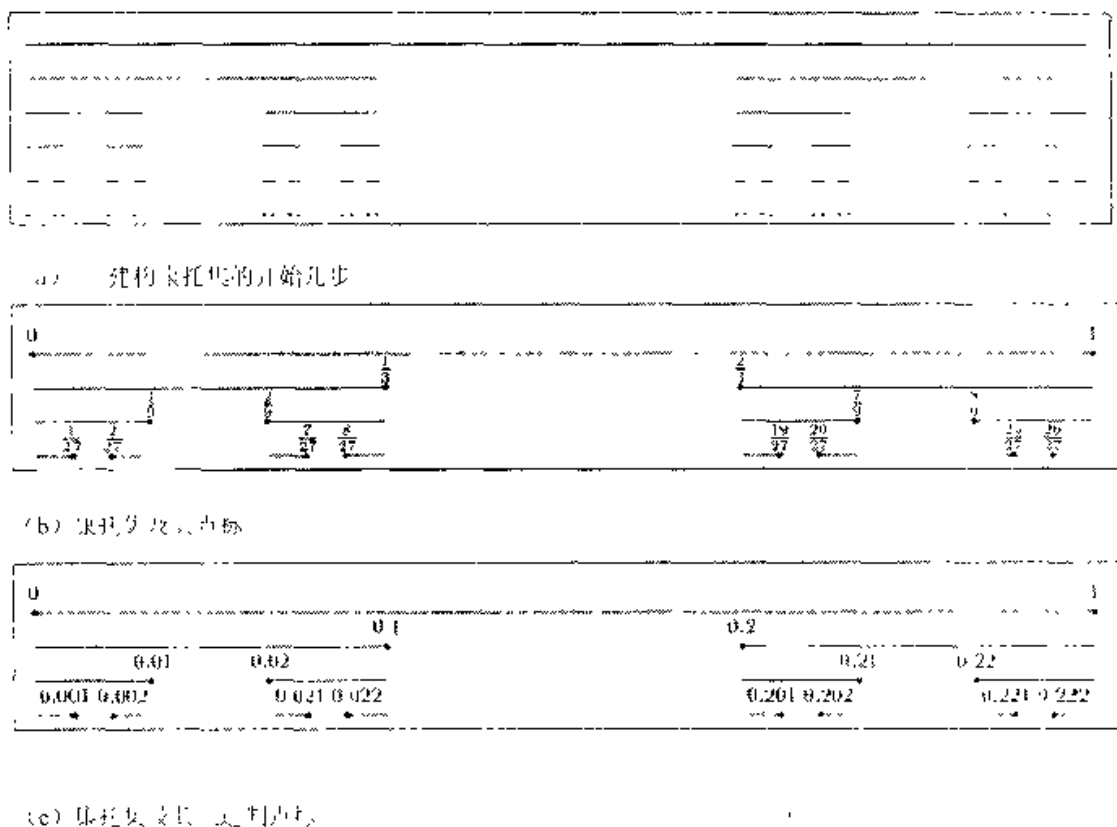


图 7.27 康托集的构造过程

(c)图。现在我们要问的问题是,用三进制来表示康托集,在区间 $[0,1]$ 中要除去一些什么,留下一些什么。由于 $(1/3)_{10} = (0.1)_3$ 以及 $(2/3)_{10} = (0.2)_3$,所以建构康托集的第一步就是一分为三,去除中段,即除去开区间 $(0.1, 0.2)$ 。而除去 $(0.1, 0.2)$ 区间的实数,就是除了0.1之外,除去小数点后第一个数位为1的数,如 $0.11\cdots, 0.12\cdots, 0.13\cdots, 0.19\cdots$ 。而在三进制中0.1本身又可以表示为 $0.1 = 0.02222\cdots$ 。在建构康托集中的第二步就是在0.01与0.02之间,以及在0.21与0.22之间除去小数点后第二位数其数值为1的数。如此类推,在康托集三进制表示中,去除了一切包含有1字的数,而只留下用0与2来表示的一切三进制数。例如十进制中的 $\frac{1}{4}$,就是被留下来了的,因为 $(\frac{1}{4})_{10} = (0.020202\cdots)_3$ 。那么康托集留下来有多少数呢?事实上,它留下来有整个实数轴那么多的数。如果你不相信这一点,请将一个三进制的数例如 $(\frac{1}{4})_{10}$ 与二进制中的 $(\frac{1}{3})_{10}$

作一个“对应”：

$$\frac{1}{4} = 0.02020202\cdots\cdots (\text{三进制})$$



$$\frac{1}{3} = 0.01010101\cdots\cdots (\text{二进制})$$

你就会得出结论,对于任何一个实数集中的数,总可以找到一个康托集中的数与它相对应。因此康托集的数有实数集那么多,也就是说它有一个封闭的域。

以上的分析表明,在建构康托集的过程中,一方面我们除去了一个单位线段长度的线,使其“宽度”为0,另一方面我们又留下了一个实数轴,它是连续的、封闭的。所以不能用0维度来测量它。要解决这个悖论,就只有引进分形几何将康托集看做是一种分形。一方面,它是自相似的。对康托集数轴进行划分的每一步,都是一分为三,去其中段,其形状都是一样的。图7.27(a)就可以看做是一种分形的图形。另一方面,它是分数维的。假定在建构康托集中的每一步都表示将你的测量尺度缩小 $\frac{1}{3}$ 倍,无论怎样缩小你的尺度,你所量得的图形长度都只有规整图形的长度的 $\frac{2}{3}$ 。这说明康托集是一种分形,其维度不是整数维,不是一维,也不是0维,而是分数维,其维度为:

$$\frac{\log 2}{\log 3} = 0.630929753\cdots\cdots$$

有关这个分数维的概念将在后面论及,并将它推演出来。在这里预先提示分数维只是让读者事先有个印象。

例2. 科赫曲线。

科赫曲线是由 H. V. 科赫(Helge Von Koch)作为处处无切线的曲线的一个实例而发现的。图7.28说明了这种曲线的建构过程。建构科赫曲线的开端(第0步)是一条单位长度的直线。

将此条一分为三,去掉中段,换成与其等长的等腰三角形的两腰(第1步)。然后将每一直线线段依此法叠代进行,便得到第3步、第4步的曲线。如果无止境地叠代下去,便得到最终的科赫曲线。这是一种很奇怪的曲线,

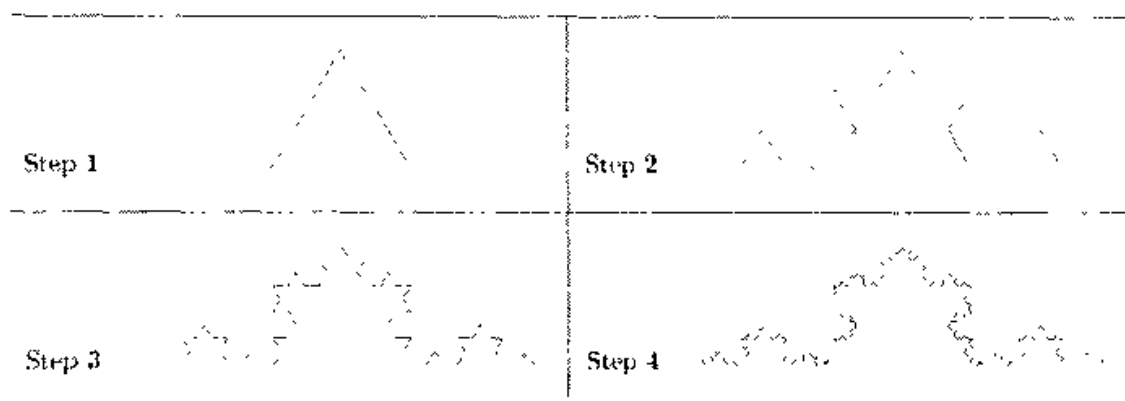


图 7.28 科赫曲线的建构过程

它处处无直线段却处处有角,因而处处无切线。

试考察科赫曲线的长度是很有意思的。从单位长度出发,第 1 步总长度为 $\frac{4}{3}$,第 2 步总长度为 $(\frac{4}{3})^2$,第 3 步的总长度为 $(\frac{4}{3})^3$,每一步该曲线长度增长了 $\frac{4}{3}$ 倍。而第 n 步,该曲线就有 $(\frac{4}{3})^n$ 的长度。下面列出一个表说明科赫曲线形成过程总长度的增长情况:

表 7.1 科赫曲线的长度

步次	线段数目	线段长度	总长度
0	1	1	1
1	4	0.333333	1.33333
2	16	0.111111	1.77778
3	64	0.037037	2.37037
4	256	0.0123457	3.16049
5	1024	0.00411523	4.21399
6	4096	0.00137174	5.61866
7	16384	0.000457247	7.49154
8	65536	0.000152416	9.98872
9	262144	5.08053×10^{-5}	13.3183
10	1.04858×10^6	1.69351×10^{-5}	17.7577
⋮	⋮	⋮	⋮
100	1.60694×10^{60}	1.94033×10^{-48}	3.11798×10^{12}

这样叠代形成的曲线,在电脑上绘图,绘到第6步、第7步,像素就不够用了,不过理论的计算向我们表明,如果出发点的单位长度只有一英寸,叠代到第100步后,科赫曲线长度可以绕地球赤道4000圈。当叠代到无限步时,科赫曲线为无限长。可是它占地极小,经计算,如果出发点的线段为 a ,则科赫曲线与底线 a 围成的面积只有 $\frac{2\sqrt{3}}{5}a^2$ 。^①科赫曲线的奇异之处就在于无限的周长围成一块极小的面积。它同样满足了分形的两个条件:第一,它是自相似的,小尺度的图形与大尺度上的图形极为相似,因为它是按照同一个叠代法则铸造出来的。第二,它具有分数维 $D = \log 4 / \log 3$,无论你将量尺缩到何等地小,想按量规整的图形的方法量准它的长度,它总要比你的量度长了 $\frac{1}{3}$ 。至于分数维怎样精确定义,将在后面的章节中进行。

例3. 皮亚诺曲线。

我们在例2中已经看到,如何将无限长的科赫曲线装进一块小小的面积里。1890年皮亚诺(Giuseppe Peano)已研究了这类曲线,它不仅可以将一块小面积里,而且可以将它填满。对于这种曲线,大数学家希尔伯特在皮亚诺之后也研究过它。

与康托集和科赫曲线一样,皮亚诺曲线的建构是从一根单位直线段开始,下一步就是用一个中字形线段(它有9个线节)侧放着来取代它,其形如图7.29的叠代1所示。中字形的每一节的长短为原来那根直线段(叠代)的 $\frac{1}{3}$ 。下一叠代是用一个更小的中字形取代上一叠代结果的每一个线节。请注意每一个中字都可以一笔画成,从中字中间的那一栋开始转弯抹角到这一栋的末尾结束,图7.29step 1中转角的箭头→表示,沿这箭头转去可一笔画成一个中字,然后转 90° 再画第二个中字,如此转8个弯便可一笔画成叠代2的图形。叠代2的图形每一线节又为一个中字所取代,如此下去经无限次叠代,一笔画成的皮亚诺曲线便覆盖填满了整个边长为单位线段长度的正方形面积。皮亚诺曲线的问题是:皮亚诺的曲线本来是一维的,但经无限叠代,却变成一个二维的平面,这就不能不引起人们思考,“维”到

① 《科赫曲线实验报告》<http://www.efg2.com/Lab/FractalsAndChaos/vonKochCurve.htm>.

底是什么

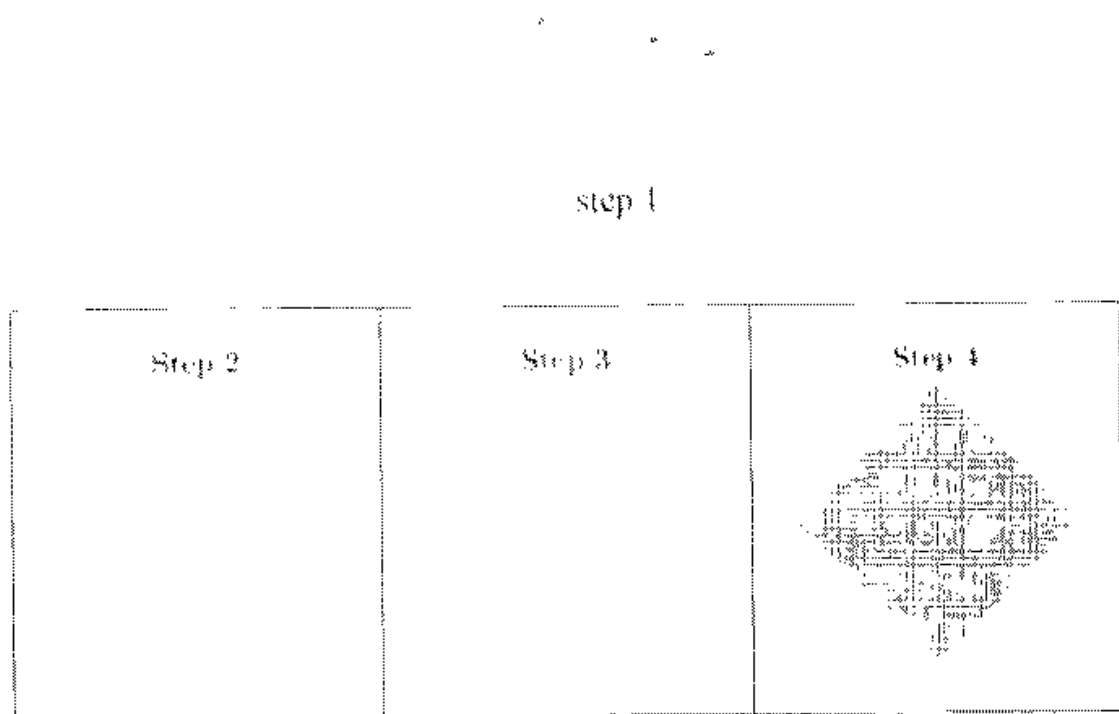


图 7.29 皮亚诺曲线的建构

例 4. 海岸线的长度问题

从康托集、科赫曲线以及皮亚诺曲线提出的问题是：怎样用维的概念来说明和区分它们？不过这个问题绝不是一个纯数学问题。英国气象学家路易斯·里查森(Lewis Richardson)1961年在测量海岸线时就提出了这个问题：他发现当测量尺度缩小时，海岸线的长度便增加。下图表明测量尺度每缩小一倍，被测的海岸线长度都增加了许多。因为，如果用公里作为测量单位，从几米到几十米的一些曲折就会被忽略，改用米作为单位，测得的总长度会增加，但一些厘米量级，甚至更小的弯曲之处还是不能准确反映出来。图 7.30 便是英国海岸测量的示意图。

里查森当时认为，尺缩对于测量长度的增加的效应并无极限。分形几何的创始人蒙德布罗重新发现了被科学共同体所忽视的里查森的工作，并认为这个实际问题与例 1～例 3 的纯数学问题实际上是一个问题：分数维的问题。

维数在经典的几何学中是一个很重要的特征量，它表示要确定一个对



图 7.30 英国海岸线的测量

象的位置所需要的坐标数目。要确定一条线的长度需要一维,要计算一个圆的面积需要二维,而要确定本书的体积需要三维,即长、宽、高三个维度。对于规整的对象来说,维数称为拓扑维数,它是整数的。维的应用是不能错位的。从测量的角度来看,为测量一块面积要用边长为 L 的方块 L^2 去覆盖它,才能取得有限数的面积,如果用 L 来量它,测得的面积为无限大。即:

$$\frac{\text{平面图形面积}}{L} = \infty$$

相反,用标准立方体 L^3 去测量没有体积的平面,结果为 0,即:

$$\frac{\text{平面图形面积}}{L^3} = 0$$

因此,用 n 维的标准体 L^n 去测量某个对象时,只有 n 与拓扑维度 d 相一致时才能得到有限结果。如果 $n < d$, 结果为 ∞ , 如果 $n > d$, 结果为 0, 以后我们会明白这种情况也适用于分数维。

理解分数维的最简单的方法就是利用分形的自相似性,取一根固定的线段为标尺,做成模块,用以覆盖被测对象。当对象为一维的线有二标尺长时,只需 2 个模块(这时是二个标尺)就能将它完全覆盖;当被测对象是边长为 2 的正方形时,我们需要 4 个模块即 2^2 个标准模块才能将它完全覆盖;当被测对象是边长为 2 的立方体时,我们就需要 8 个即 2^3 个标准模块才能填满它。这样,如果对象为 d 维,要测每维度为 2 的物体,测得的标准

模块个数 $N = 2^d$ 。这样每维度为 a 单位的总模块个数为 $N = a^d$ 。注意 d 为维数, N 为被测对象的数量, a 为在每个维度上测得的数量。这样我们便可解出维度的表达式, 即从 $N = a^d$ 得出:

$$d = \log_a N$$

运用对数的换底公式, 得:

$$d = \frac{\log N}{\log a}$$

我国著名理论物理学家和非线性科学家郝柏林教授说: 运算到这一步, “我们就完成了一次‘飞跃’; d 不必再是整数, 以后把这样推广定义的维数称为分维, 用大写字母记为 D_0 。”^①

现在, 我们可以将 D_0 用于上述 4 个例子了。

康托集的维数为 $D_0 = \log 2 / \log 3 = 0.630929753 \dots$ 因为我们总是用 3 个单位长度的尺, 测得的模块为 2 个单位。这就得出了分数维。

科赫曲线的维数为 $D_0 = \log 4 / \log 3 = 1.26186 \dots$ 因为我们总是用 3 个单位长度的尺, 量出 4 个模块的长度。

皮亚诺曲线的线数为 2。不仅是因为这个曲线填满了某个二维空间, 而且根据维数公式, 它的形成总是用 3 个单位的尺量出 9 个单位的模块长度来。即 $D_0 = \log 9 / \log 3 = 2$ 。

至于实际海岸线的维数, 根据郝柏林的介绍, 其 D_0 约等于 1.2。^②

▷▷ 7.3.2 复平面上的分形

大家知道, 在解方程 $x^2 = -1$ 时, 得到的解是 $\sqrt{-1}$, 它是一个虚数, 记作 i 。于是数学家们不得不扩展数的领域, 从实数推广到包括虚数在内的复数。同样, 各种函数式的叠代当出现虚数解时, 就不可避免要推广到复数。本节所要研究的问题就是要在复数域上进行叠代, 研究在复平面上进行叠代产生的分形, 特别要研究其中两个著名的集合: 蒙德布罗集 (Mandelbrot Sets) 和朱莉亚集 (Julia Sets)。

首先我们来复习高中时学过的复数和复平面。复数的形式就是一个数

① 郝柏林:《混沌与分形》, 上海科学出版社 2004 年版, 第 53 页。

② 同上书, 第 66 页

对 $(a + bi)$, 其中 a, b 为实数, a 称为复数中的实数部分, bi 称为复数中的虚数部分。虚数和实数一样, 同样是“实在”的。当然并不是说, 例如 $10 + 2i$ 表示 10 个指头之外, 还有两头虚指头, 而是说复数与虚数作为一种数学工具, 它频繁地运用于物理学、工程学中来说明自然现象。复数的运算法则极为简单:

1. 加法规则: $(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i$

2. 乘法规则: $(a + bi) \times (c + di) = (ac - bd) + (ad + bc)i$

大家知道, 实数是用一根实数轴来表示的, 在这根实数轴上的任一点不是表示整数就是表示分数, 不是表示有理数就是表示无理数, 实数轴是处处稠密的, 它无法表示虚数。虚数想在实数轴上占有一个位置, 实在是无插针之地。因此, 复数的虚数部分是用另一根数轴来表示的, 于是实数轴 X 与虚数轴 Y 便构成了一个复数平面。这个复平面上的任意一点有某一复数值与它相对应, 反之, 任一复数值在复平面上有一个点与之相对应。这样一个复数可以用从原点出发的一个矢量来表示, 这个矢量的横坐标值为它的实数部分, 纵坐标值为它的虚数部分, 于是两个复数相加, 如矢量相加一样, 可用两个从原点出发的矢量组成的平行四边形的对角线来表示, 见图 7.31, 而复数的乘法可用图 7.32 表示, 不过其结果在图中并不那么直观。

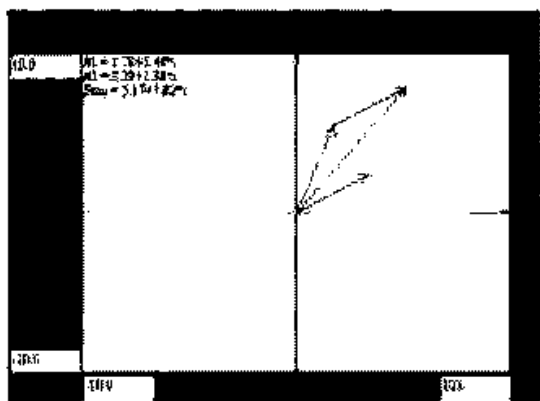


图 7.31 复平面上的复数加法

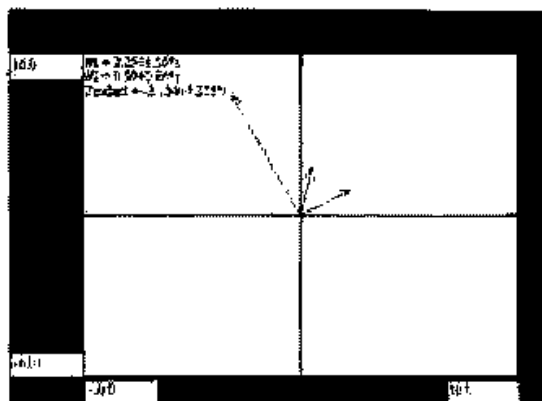


图 7.32 复平面上的复数乘法

有了复数和复平面的概念, 我们便可以讨论蒙德布罗集合了。B·蒙德布罗是仔细研究叠代方程

$$Z_{n+1} = f(Z_n, C) = Z_n^2 + C$$

的第一个人, 他的问题是: 置 $Z_0 = 0$, 对于某些复数值 C , 当 $n \rightarrow \infty$ 时, Z_n 会发

生什么情况?例如当 $C = 0$, 从 $Z_0 = 0$ 出发叠代, 无论叠代多少次, $Z_n = 0$ 。这就是说这个函数序列的值域是“有界”的。再如, 置 $C = i$, 从 $Z_0 = 0$ 出发叠代, 则 $Z_0 = 0, Z_1 = i, Z_2 = -1 + i, Z_3 = -i, Z_4 = -1 + i, Z_5 = -i$ 。由于 $x_3 = x_5$, 所以往下的叠代是在 $-i$ 与 $-1 + i$ 二点之间进行振荡, 即落入周期 2。

对于其他的 C 值, 事情不是那么简单。例如当 $C = 1 + i$, 叠代出来的序列为: $0, 1 + i, -7 + 7i, -7 - 97i, -9407 - 193i, 88454401 + 3631103i, \dots$ 其数值不断增长。在这种情况下, 我们称序列为发散的。那么, 什么样的 C 值会导致函数值序列是有界的, 而什么样的 C 值会导致函数值的序列是发散的呢? 这并不是一个很容易回答的问题。例如, 前面说过, $C = i$ 时, 序列是有界的, 但如果取 $0.01 + i$, 我们却得到序列 $0, 0.01 + i, -0.9899 + 1.02i, \dots, 111.001311 + 57.871075i, \dots$ 它是无界的, 即发散的。这就是说, 初始条件稍稍改变, 函数值的序列就会发生根本变化: 从有界的、收敛的变成无界的、发散的。一般说来, 当 $Z_n = a + bi$ 时, 若 $a^2 + b^2 > 4$, 则我们能确定序列无疑是发散的, 不过情况比这个一般的域复杂得多, 在复平面上有无限个序列, 它停在这个域相当一会儿, 然后在巨大的叠代后逃离这个域, 并且正如我们刚刚讲过的例子, 有时有两个 C 值非常接近, 我们很难根据其中一个 C 值的行为来确定另一个 C 值是有界的还是发散的。所以貌似简单的函数 $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ 的叠代导致了极为复杂的情况。

蒙德布罗使用一种特别的技术, 将不导致函数叠代发散的 C 值的集合的轮廓绘画出来, 这个集合被称为蒙德布罗集合。在复平面上它很像是一只瓢虫, 受到电击, 瓢虫四周发出闪电, 蒙德布罗使用的技术叫做逃逸时间算法 (escape time algorithm), 即在复平面屏幕的一定范围里 (其范围为上式的 $a^2 + b^2 = 4$ 的范围内或 $|x_n| = 2$ 的范围内) 检查每一个像素, 使每个像素与方程式 $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ 中的 C 相对应。如果该函数叠代若干次后迅速发散, 我们保留该点有屏幕背景的颜色。如果该函数叠代若干次后迅速收敛, 我们也保留该点的背景颜色。但是有一些像素所对应的函数要叠代许多次, 然后逃离蒙德布罗集, 于是蒙氏规定一个最大限度, 叫做 $n - \max$, 经过这个最高次数的叠代仍不发散者, 就是蒙德布罗集的边界, 其他的其对应函数的叠代没有迅速发散的像素点, 按其逃离前停留在屏幕的次数多少涂上不同的颜色。如此进行, 在历遍所有的屏幕像素之后, 蒙德布罗图像显

示出来了(见图 7.33,图 7.34)。

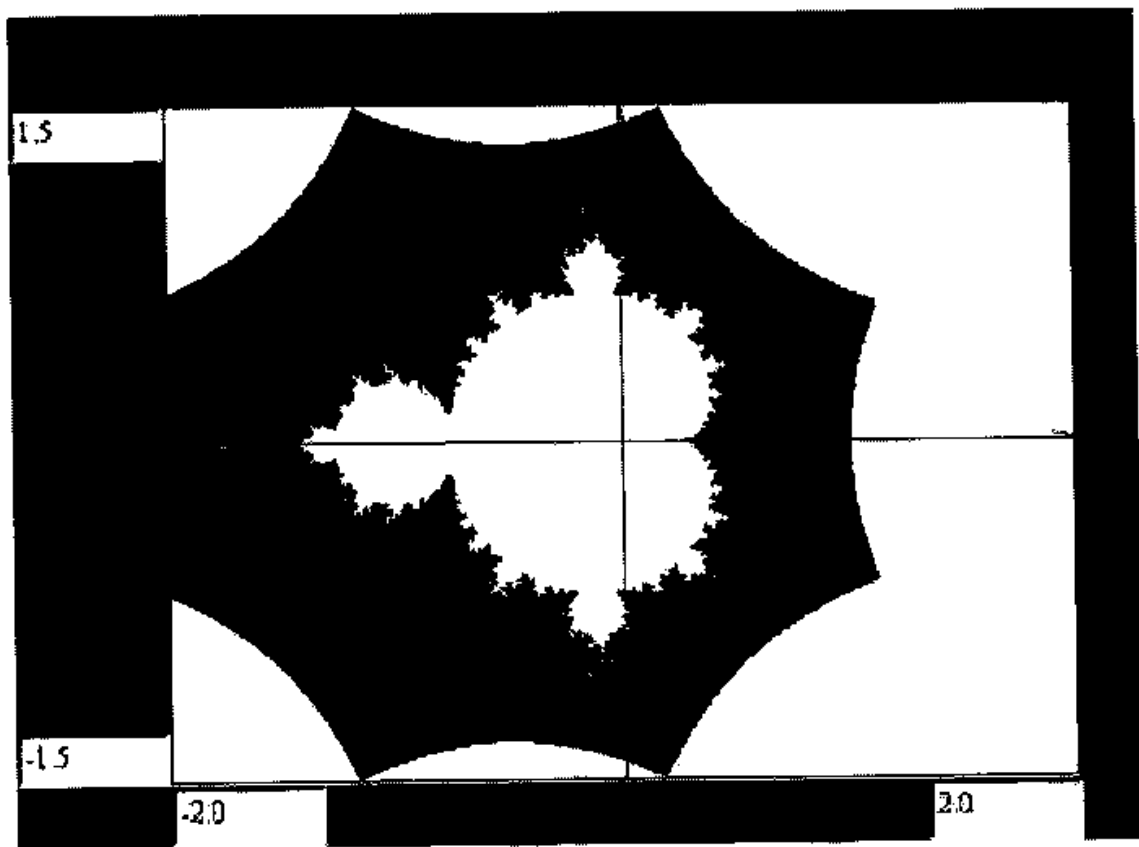


图 7.33 蒙德布罗集(背景颜色为白色)



图 7.34 蒙德布罗集(图形为黑色,其他为白色)

当蒙德布罗发现这个图形时,他大吃一惊。因为数学的性质是一种理想化的、规整的、无生命的东西,为什么这个蒙德布罗集像是个眉毛胡子什么都有的东西?它也像个仙人掌,仙人掌上又长出仙人掌。他怀疑是否电脑出了一点什么毛病,或者是电脑本身做成的某种人为的东西。于是他进一步进行研究,将这个图用电脑一步步进行精确的放大。图 7.35 中显示了

6 张图。从第一张左上角到第二张右上角,一直到第六张右下角,层层放大,共放大了 12000 倍,于是发现了更加丰富,更加多样,更加稀奇古怪的东西。第二张图放大了大蒙集到小蒙集之间的峡谷,第三图放大了蒙集边缘上的螺旋形的胚芽,第四图,第五图说明这种螺旋形的对数性质,第六图是一幅非常美丽的艺术画。

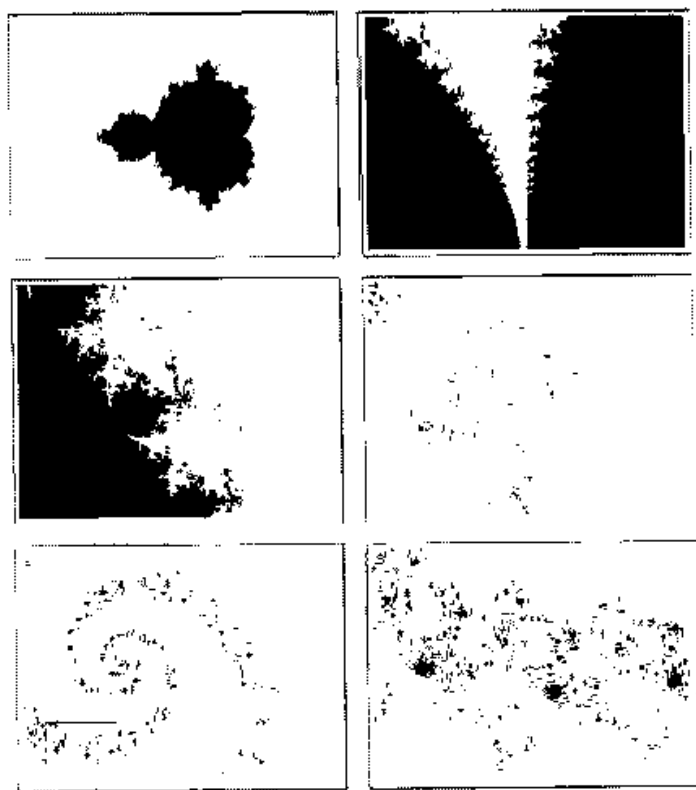


图 7.35 蒙德布罗集的层层放大

我们特别要注意的是,蒙集以更具体的形式说明了上小节所说的分形图。它是一幅海岛图,海岛岸上又连着小岛,螺旋边上又连着螺旋,无休止地出现,它是无限长的,因而是具有分数维的;它是自相似的,至少是近似地自相似的,即小尺度上的形状相似于大尺度上的形状。就像水流中的旋涡里面有旋涡,气象中的云层里面有云层一样。

更值得我们注意的是,蒙德布罗集的关键特征就是它由一连串类似于碟子的形状连叠起来,每个碟子都有不规则的边界,从图 7.33 的实数轴向负方向左移进行观察,一个碟子的直径与下一个碟子的比例恰好等于上节所说的费根鲍姆常数 $4.6692\cdots$ 。这是怎么一回事呢? 同一个数字在看来完全无关的地方突然出现了。逻辑斯蒂函数是二次函数,正弦函数是三

角函数,高斯函数是指数函数。现在又来了一个蒙特布罗函数,它是复变函数,不属于上面任何一种函数。如果它们有什么共同的东西,那就是叠代本身。是不是叠代过程本身将这个序(费根鲍姆规律)带到混沌的边缘中去,并带进混沌本身之中呢?是怎样带进来的呢?这有待于系统科学家和哲学家进一步进行研究。但无论如何有一点是肯定的:简单的东西经反复叠代后,会产生出极其复杂的东西。

最后,关于朱莉亚集,我们也要讲几句。朱莉亚集也是从 $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ 的方程出发,不过这里 C 是固定点,只是改变 Z_0 ,让 Z_0 为变量,历遍所有像素,看哪些是发散的,哪些是收敛的, Z_0 造成 $Z_n^2 + C$ 收敛的值组成一个集,这个集叫朱莉亚集,它与蒙德布罗集有密切的关系。这里我们限于篇幅,不做进一步研究了。

►► 7.4 动力系统与混沌吸引子

在本章的导言中,我们已经讲过什么是动力系统,它是从运动和进化的视角来研究系统。一个系统,无论大至银河系,小至亚核粒子,只要它是随时间而变化的,我们便称它为动力系统。研究动力系统的目的就在于理解现在,预测未来。为了研究动力系统,预测未来,首先需要选择变量,与我们所要研究的运动无关的特征一般加以忽略,特别注意选出例如位置、速度(变化率)、加速度这些变量来加以研究;其次需要探求这些变量的变化规律。这些变化规律在连续数学中,通常用微分方程来加以表示,例如,要研究非线性动力系统,我们以二阶非线性常微分方程为例,就有:

$$x'' = f(x, x') \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

其中 $f(x, x')$ 是作用于单位质量质点上的力, $x'' = \frac{d^2x}{dt^2}$ 表示质点的加速度。 $x' = \frac{dx}{dt}$ 表示 x 的速度, s 与 x' 刻画了该系统任一时刻的状态,所以称它为相,而 (x, x') 的平面,称为相平面,在相平面上加上一条时间的轴,称为相空间: (x, x', t) , 它是三维相空间。

若令 $y = x'$, 则方程(7.6)化为常微分方程组

$$x' = y$$

$$y' = f(x, y) \dots\dots\dots (7.7)$$

方程组(7.7)的解 $x(t), y(t)$ 在相平面 (x, y) 上为一曲线簇, 叫做轨线簇。它定性描述了系统状态在全部运动时间 $t \in (-\infty, +\infty)$ 内的变化。在确定了初始条件 $x = x_0, y = y_0$ 之后, 运动方程的解就是三维相空间 (x, x', t) 中运动着的一条轨线。

研究动力系统行为的主要方法有三种: (1) 解析方程, 即解微分方程, 分析解的性质来研究动力系统的行为。(2) 几何方法, 主要用直观的几何形式分析系统的动力性质。(3) 数值计算方法, 即用计算机进行数值计算, 求得近似解。由于微分方程, 特别是高阶非线性微分方程, 一般都无求解的通用方法, 而且要求高超的数学技巧, 而计算机数值计算一般要求有编程的技术, 对于本教材的对象来说都是不合适的, 所以本节主要采用几何的方法, 力图帮助没有系统学过微分方程的学生定性地学到动力系统以及混沌吸引子的基本概念。

▷▷ 7.4.1 从动力系统的观点看单摆

1. 从状态变化的观点看

作为研究动力系统的最简单案例, 本小节考察无摩擦且小角度摆动的单摆, 它的任何一个时刻的运动状态完全由该时刻的位置与速度确定。知道前者就可以完全推出后者, 这是因为这里的单摆遵循着自然规律, 完全可以由微分方程

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = g \sin \theta$$

求得, 这里 p 为摆锤离平衡点的位置, g 为重力加速度, θ 为摆锤与垂直方向的夹角, 它是时间 t 的函数。我们没有必要在这里解出 p 与 t 的关系, 而只从几何的观点来研究它(见图 7.36)。

图 7.36 的上半部分是一个现实空间(Real Space), 下半部分是一个测绘空间(Plot Space), 位置 p 由摆锤与中垂线即 t 轴之间的距离测得。这个时间轴方向为垂直向下, 位置与时间的关系为 $p = A \sin(t)$ 。为了更好地理解摆的运动, 我们将速度 v 与位置 p 的变化合成一图(见图 7.37), 其中一条轨线为位置变化轨线, 另一条轨线为速度变化轨线。

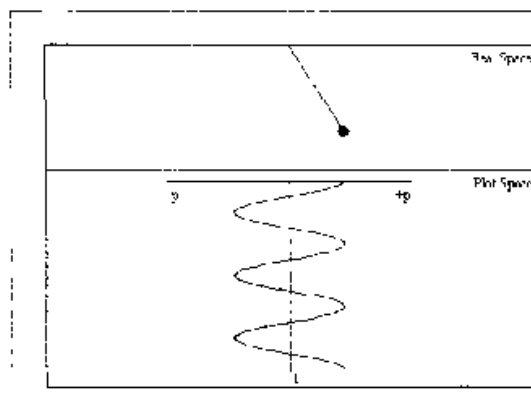


图 7.36 单摆中位置与时间的关系

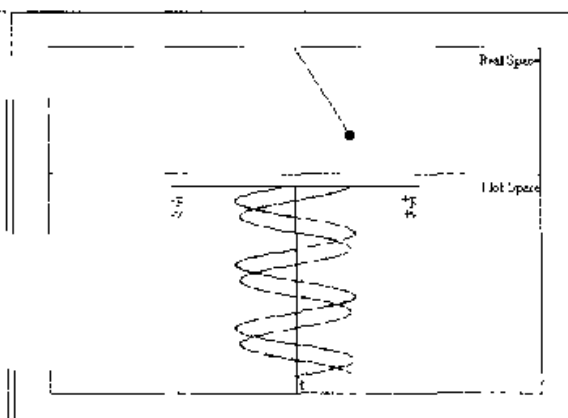


图 7.37 单摆中速度、位置与时间的关系

现在,再让我们考察摆在支点上和在空气中有摩擦时的状态变化,它就展示为图 7.38 的轨线:

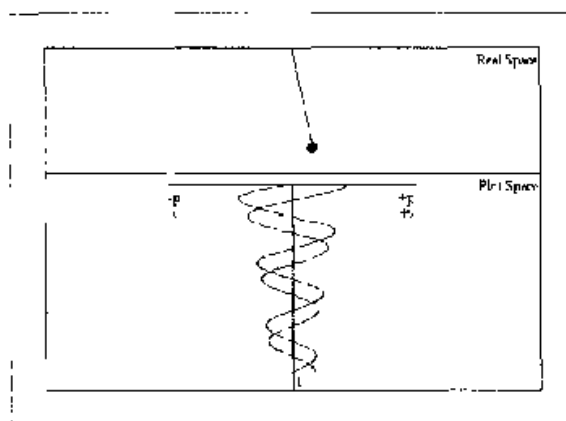


图 7.38 有阻尼的单摆的状态变化

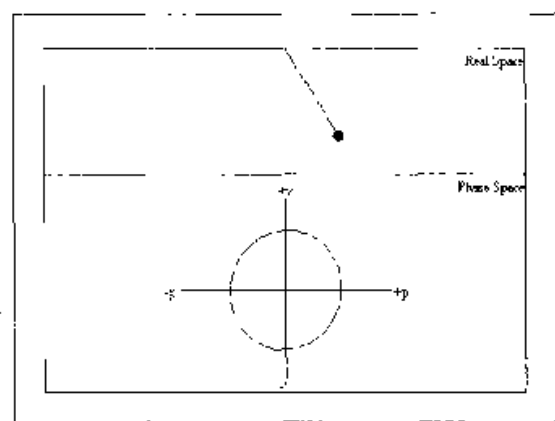


图 7.39 单摆在相空间中的状态变化

这里所谓有阻尼的摆动(damped swing),就是这种摆动或振动,但因摩擦阻力,其振幅逐渐减小,最后达到停止。在以后我们研究的动力系统中,经常都要考察有摩擦力存在的情况。

2. 从相空间的观点看

现在,我们转向运用刚才我们说过的相空间的概念来研究单摆运动,包括研究无摩擦的摆在二维相(p, v)平面中的运动。随着现实空间中的摆一个来回摆动,就在(v, p)相平面中描出一个椭圆形(见图 7.39)。这里状态点在相平面上的运动称为“相空间轨线”(phase space orbit)。当我们研究单摆在阻尼中(即有能量消耗的)运动时,相空间的轨线会是一个螺旋形(见图 7.40)。这个螺旋形的振幅越来越小,最终逼近一个原点(0,0),它

就是这个系统在相空间中的吸引子,而且是点吸引子。

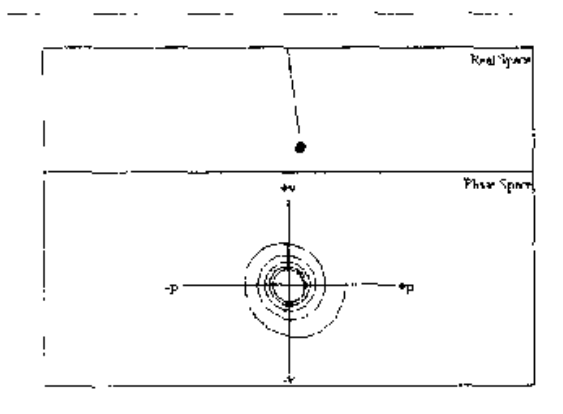


图 7.40 有阻尼的单摆在相空间中的状态变化

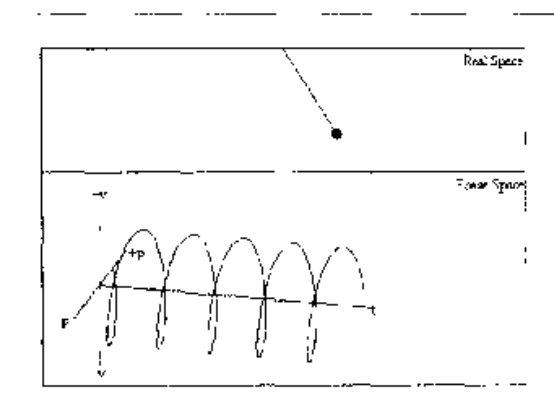


图 7.41 单摆在三维相空间中的状态变化

现在,我们在相平面上加上时间的维度,于是相空间成为一个三维相空间,在 p 与 v 的轴的交点上垂直树立一条时间坐标。随着时间的推移,单摆就在三维相空间中描出一条弹簧形的轨线(见图 7.41);有阻尼的单摆在相空间中描出的是头大尾小的弹簧形轨线(见图 7.42)。

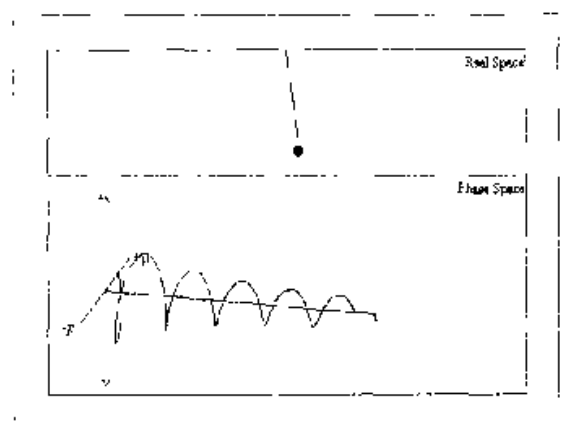


图 7.42 有阻尼的单摆在三维相空间中的状态变化

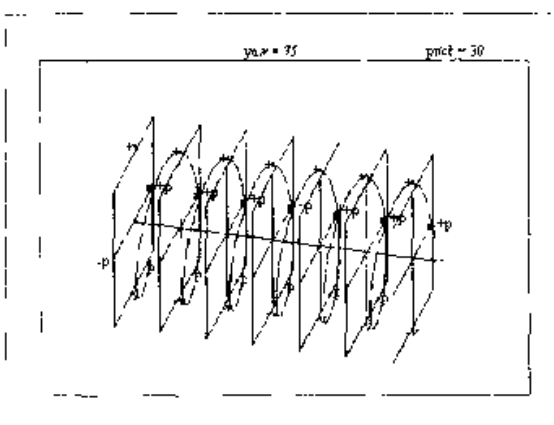


图 7.43 单摆的相空间在时间轴上的周期截面

3. 从周期横截面的观点看

单摆的摆从最右端摆到最左端再返回右端而完成一个周期需要多少时间呢?这个数字对于研究周期运动极为重要。因此从几何上表示这个周期,可以在三维相空间的时间轴上,以周期的数值作单位将它划分为一段一

段,每段垂直插上一个 (v, p) 平面,摆锤在相空间运动的轨线与这平面的交点就表示了从摆出发点完成若干周期所在的位置(见图 7.43 与 7.44)。其中图 7.44 表示摆的有阻尼的运动状态轨线。

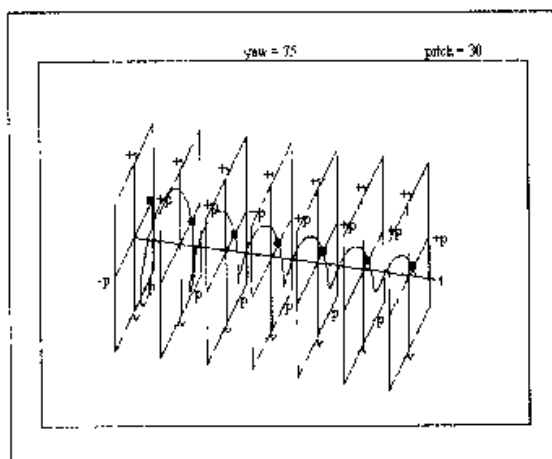


图 7.44 有阻尼单摆的相空间轨线

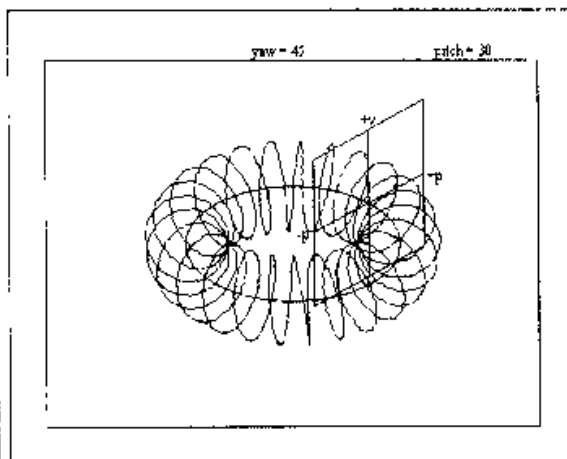


图 7.45 在时间轴上的周期截面

为了研究一种旋转运动经若干周期后又返回原来的出发点,就像月球围绕地球旋转、每月一周期经若干年又返回原来的出发点那样,有必要将相空间的时间轴建构成圆形,从原点出发走过一个环回到原点本身。图 7.45 与图 7.46 展示了这种情况,前者是无阻尼的,后者是有阻尼的相空间轨线。请注意这个时间轴也是垂直于相平面的。在这里吸引子是一条时间轴,无论有阻尼的运动还是无阻尼的运动都是如此。

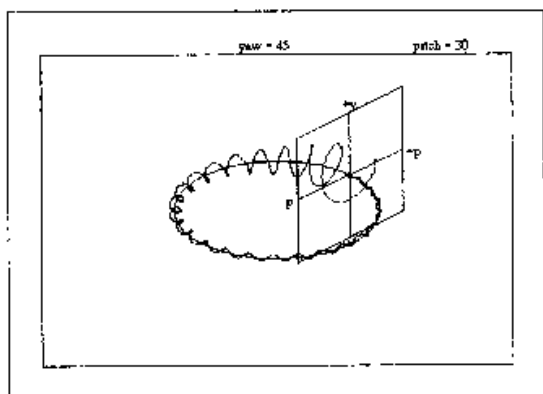


图 7.46

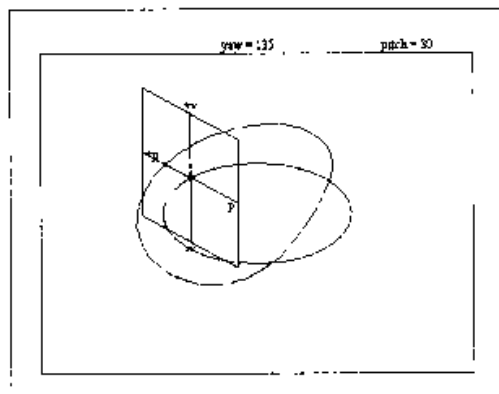


图 7.47

还有一种特殊情况必须论及,就是建构一个相空间图形,其时间轴的圆

形恰巧等于单摆的一个周期,这种图形有特别的形状,见图 7.47 与图 7.48,图 7.48 是有阻尼的情况。

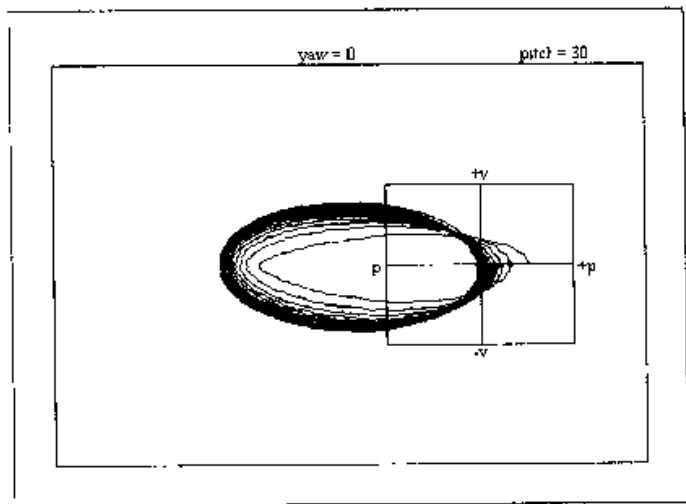


图 7.48

▷▷ 7.4.2 达芬振荡器实验和混沌吸引子

上节通过最简单的单摆例子,为我们提供了研究动力系统和混沌吸引子的视野:这就是要从状态变化的观点,从相空间的观点,从周期的观点以及从周期轨线横截面的观点来进行分析。动力系统问题不是纯数学问题,其中有两个问题特别值得我们注意:(1)动力系统着重研究运动的周期和振荡,即有某种事情或状态重复出现。如果它们的运动、变化很快就在我们的视野中消失得无影无踪,再也不能以某种形式出现在我们的面前,这种来无影去无踪的事,不论它有多么奇妙,也不能引导我们认识现在预言未来,我们对此并没有多大的兴趣。(2)动力系统的研究和纯数学不同,需要考察它的物理意义,需要有运动原因或机制的研究。在物理世界中,这就是要研究各种力及其效应。在上一小节中我们研究单摆,从动力学的观点看,其中有两种力发生作用,一种是地心引力,它是作用单摆的外力;另一种是空气的阻力与摆锤拴在支点上的机械摩擦力,我们用阻尼力来表示它。

1918 年达芬(Duffing)创造了一个实验,叫做达芬振荡器,现在用电脑加以处理,成为研究混沌或混沌吸引子的最重要实验工具之一,它的结构如图 7.49。

达芬振荡器有一个拱门形支架,中间固定着一条相当坚硬的金属细带,顶端有一强电磁铁。提供的交变电磁场吸引着一根金属条带,使它上下振荡。在振动中,有三种力必须加以计算:(1)外加电磁驱动力:金属条带的能量在每一个振荡的周期里,都因空气阻力和发热而受到损耗,这种损耗由外加



图 7.49 达芬振荡器

的电磁力来加以补偿,使之继续振荡。金属条所受的外加驱动力是时间的函数,其形式为 $B \cos(t)$ 。这里 B 是振幅。(2)复原力:随着金属条带的弯曲,其中点可以用来测量运动的量。金属带是紧紧地悬挂在框架上的,几乎不能动弹,它的横向移动 x 只能通过拉长其物质质料来实现,分子之间就有一个强大的键力使它复原。这个复原力,经实验测得是与它的位移量的三次方成正比,在选定了比例系数后等于 x^3 。(3)金属带振动时的阻尼力,与其运动的速度成正比,即等于 kx' 。于是:达芬振荡器的方程可表述如下:

$$x'' + kx' + x^3 = B\cos(t), \text{ 其中 } x = x(t) \dots\dots\dots (7.8)$$

图 7.49 中, $\cos(t)$ 是简化了的,它的完整表述应该是 $\cos(\omega t + \varphi)$ 。 ω 叫做角频率, φ 称为相角。不过选定质量为 1, 即总合力 $F = x''$; 选定振幅 $B = 15$, $\omega = 1$, $\varphi = 0$; 以及 $k = 1$ 。故有图 7.49 下端的达芬振荡器方程

$$F = 15\cos(t) - x^3 - x', \text{ 其初始条件 IC 为 } (0,0) \dots\dots\dots (7.9)$$

依据这个方程,绘出状态图 7.50,其形式比 7.4.1 讨论的单摆复杂得多。

依据同样的方程绘出的相空间图,图形比 7.4.1 的单摆复杂一些,但仍然是周期吸引子的情况,见图 7.51,请注意图下端有关这个振荡器的说明, $IC = (5.0, 5.0)$ 为初始条件。

当然,我们可以运用达芬振荡器来研究周期 2、周期 3 等各种周期吸引子情况,不过现在我们特别感兴趣的是运用达芬振荡器来研究混沌吸引子,它又被称为奇异吸引子。在达芬方程中,要使一个周期吸引子转变为混沌吸引子,关键在于改变公式(7.8)中的振幅参数 B 或/与阻尼参数 k 。例如下列方程

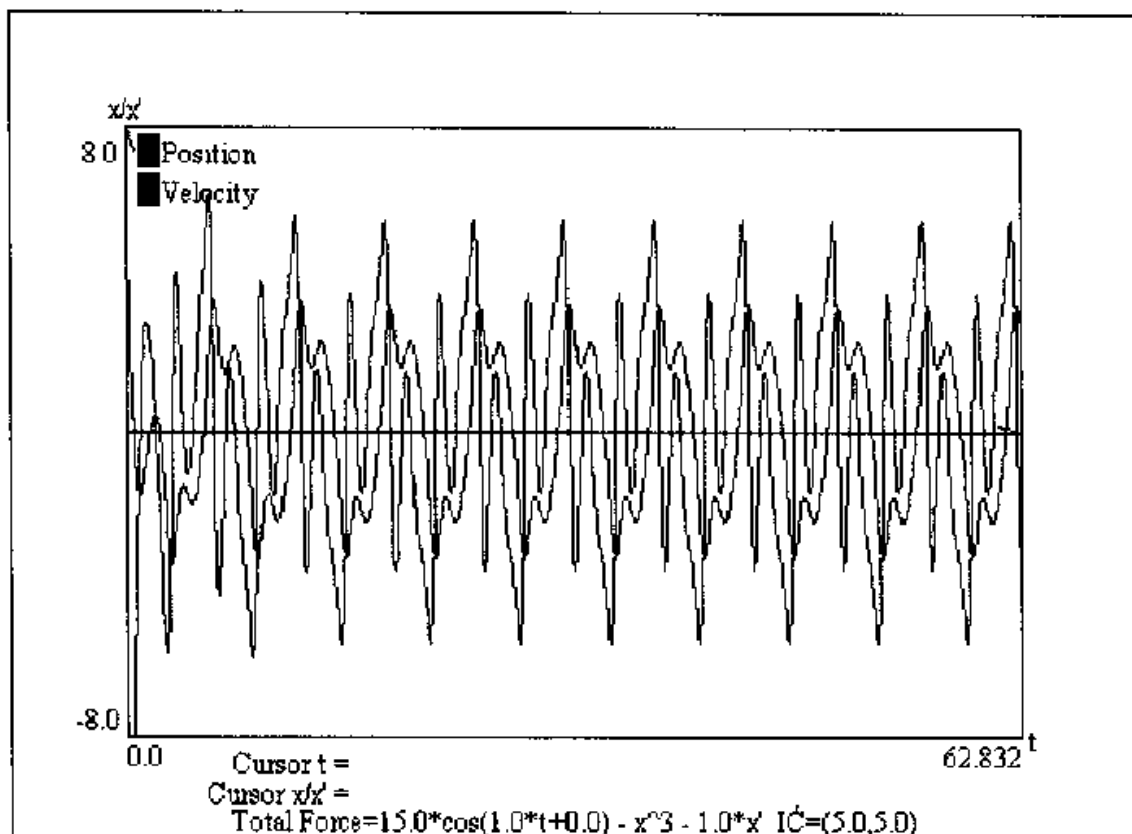


图 7.50 达芬振荡器状态图

$$F = 7.5 \cos t - x^3 - 0.05x$$

由于振幅参数和阻尼参数都适当地改变了,它就是一个展示出系统的混沌吸引子的达芬方程。

请看图 7.52,它是一个状态变化图,即位置、速度随时间而变化的图,随着时间的推移,状态轨线反复地在正值和负值之间回来跳动,所以我们可以说它是一种振荡,但是如果你沿着 t 轴取任何一组 x 值与 x' 的值,你不能在图形的任何地方找到精确地相同的一组同样的值,即使你按同样的方程、同样的初始条件重新按一下绘图按钮,也不会找到严格地重复的周期,这就是混沌吸引子的明显特征。

混沌系统的这种性质,称为系统状态的无规则性(irregularity)或不重复性(unrepeatability)。这个事实是一个严重的事实,对科学和哲学都是一个极大的挑战,因为理性的最重要功能是能够预测未来,科学的最重要事业是预测未来将要发生的事件。但是当—一个系统进入混沌状态之后,由于它的无规则与不可重复,就具有一种不可预测性,甚至短期预测未来状态严格地说也成为不可能的。这就是混沌系统或系统混沌状态的第一种性质,叫

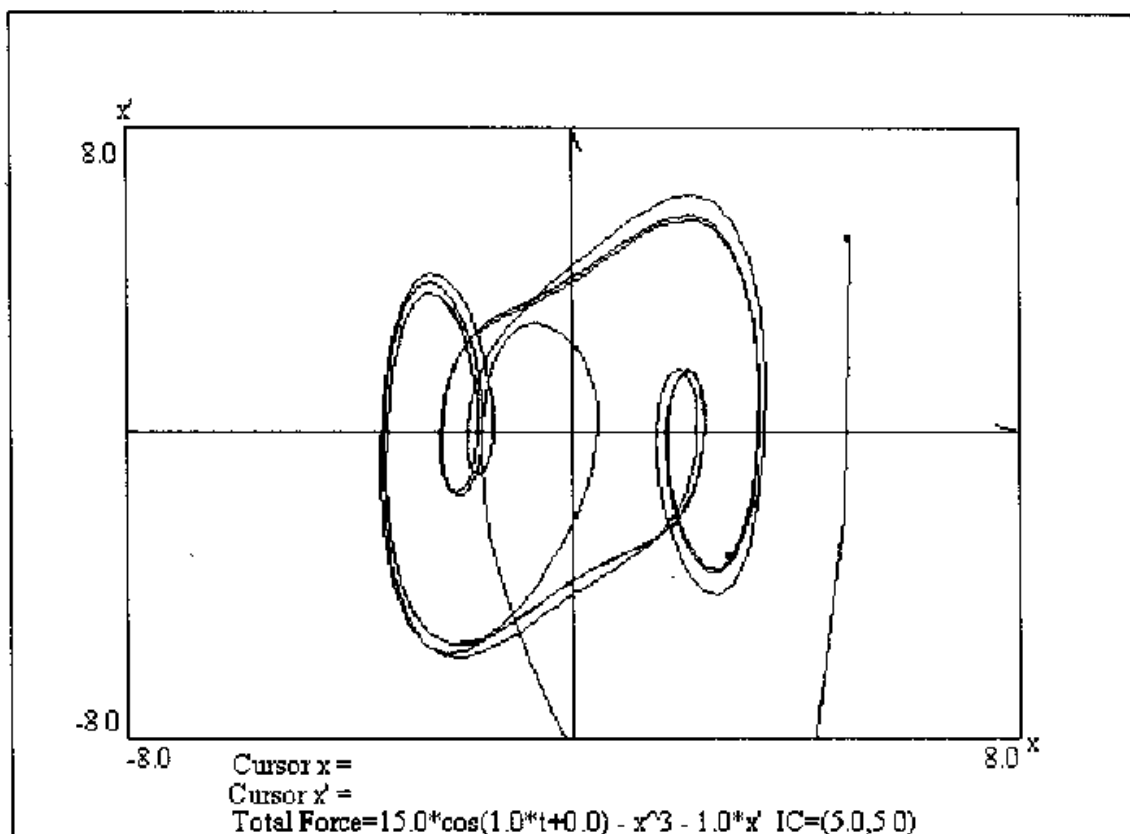


图 7.51 达芬振荡器的相空间

做不可预测性(unpredictability)。特别有趣的是,这种不可预测性并不是由系统方程的随机性或偶然性造成的。混沌系统是完全决定论的,或完全决定性的,而不是随机的。在混沌系统的方程中,无论是我们在 7.1 讲的逻辑斯蒂叠代方程,还是本节讲的达芬方程,都没有一个统计的或随机的项。从数学上讲它的结果是完全确定的:给定混沌系统的先前历史,系统的未来是完全被决定的。这里我们要区别随机性与混沌这两个概念。随机过程是与系统先前状态无关的,而混沌过程却是系统先前状态的必然结果。从拓扑的观点看,随机过程在状态空间中只是斑点般的,而混沌过程在状态空间或相空间中却有着较为稳定的结构(关于这一点后面我们还要进行讨论)。所以混沌系统或系统混沌状态的第二个特征是它是决定性的。混沌系统既然是决定论的,又是不可预测的,这便构成一个哲学难题。有人说它是决定论的,但是是不可计算的,所以是不可预测的;有人则说,它是决定论的,也是可计算的,只因为我们的认识不能对其进行精确计算,所以是不可预测的;有人则说,这种不可预测性不过是海森堡测不准关系的一种表现。这些哲学的分歧不一而足。我们暂且将这个问题搁置起来,让我们从动力系统

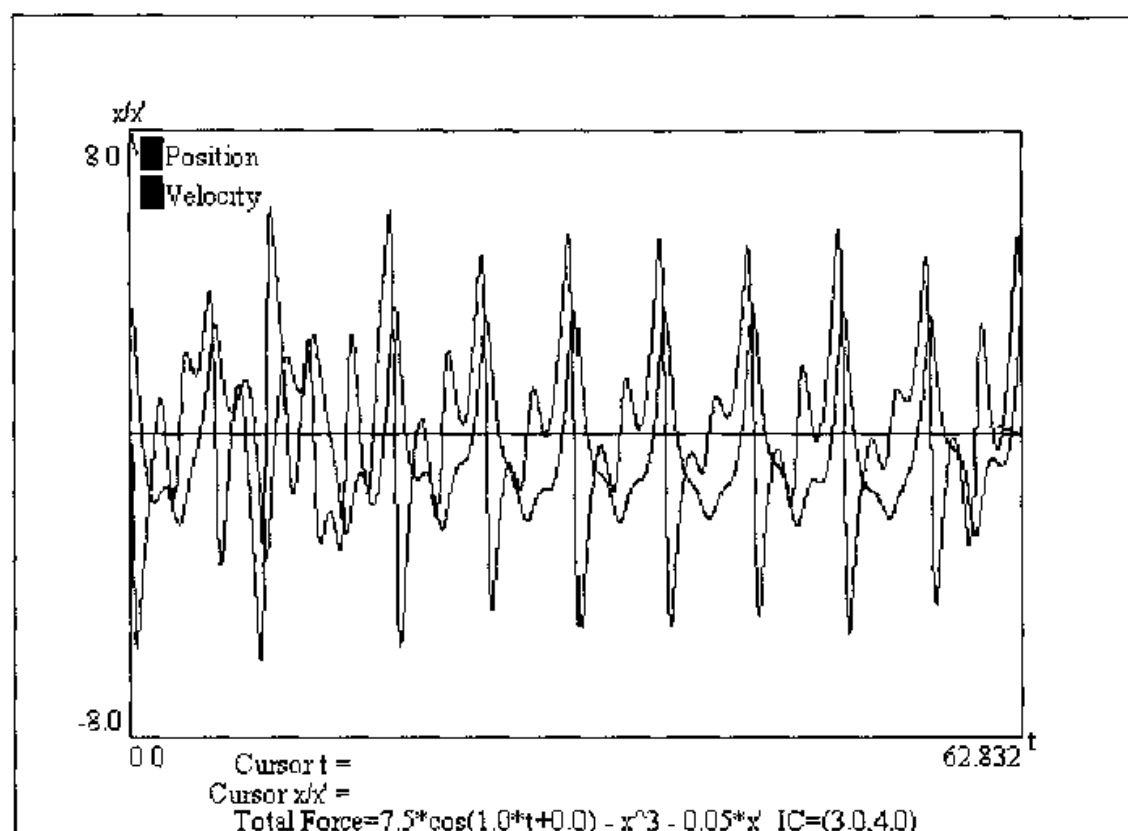


图 7.52 达芬方程的混沌状态图

的观点继续讨论混沌系统的基本特征。

混沌系统的第三个基本特征就是它对初始条件的极度敏感性。这就是说,由于这种动力系统的吸引子是混沌吸引子,只要初始条件稍稍有微小的干扰与变动,系统行为的分叉使能指数增长,差之毫厘,失之千里,经一段时间之后,它变得与未受干扰时的行为仿佛完全没有关系。图 7.53 展示了达芬方程的状态变化对初始条件的敏感性。

图 7.53 中,在 $t=30.4$ 处系统的位置状态只有 0.1%,即千分之一的微扰,系统后面的行为就变得面目全非了。有微扰的行为轨线用红线表示,没有这个微扰的行为用绿线来表示(本图因无彩印,红绿色未能区分出来,但两条线的区分是明显的)。图中清楚地说明混沌系统对初始条件的敏感性。这种敏感性被气象学家、混沌理论创始人之一爱德华·洛伦兹(Edward Lorenz)称为“蝴蝶效应”(butterfly effect):

他曾经说过,巴西一只蝴蝶拍拍它的翅膀,会在美国德州产生极大的风暴(见图 7.54)。他提示了世界的天气变化是一个这样的动力系统:它是在混沌吸引子的模型下运作的。当然并非每一只蝴蝶都有这个效应,但处于

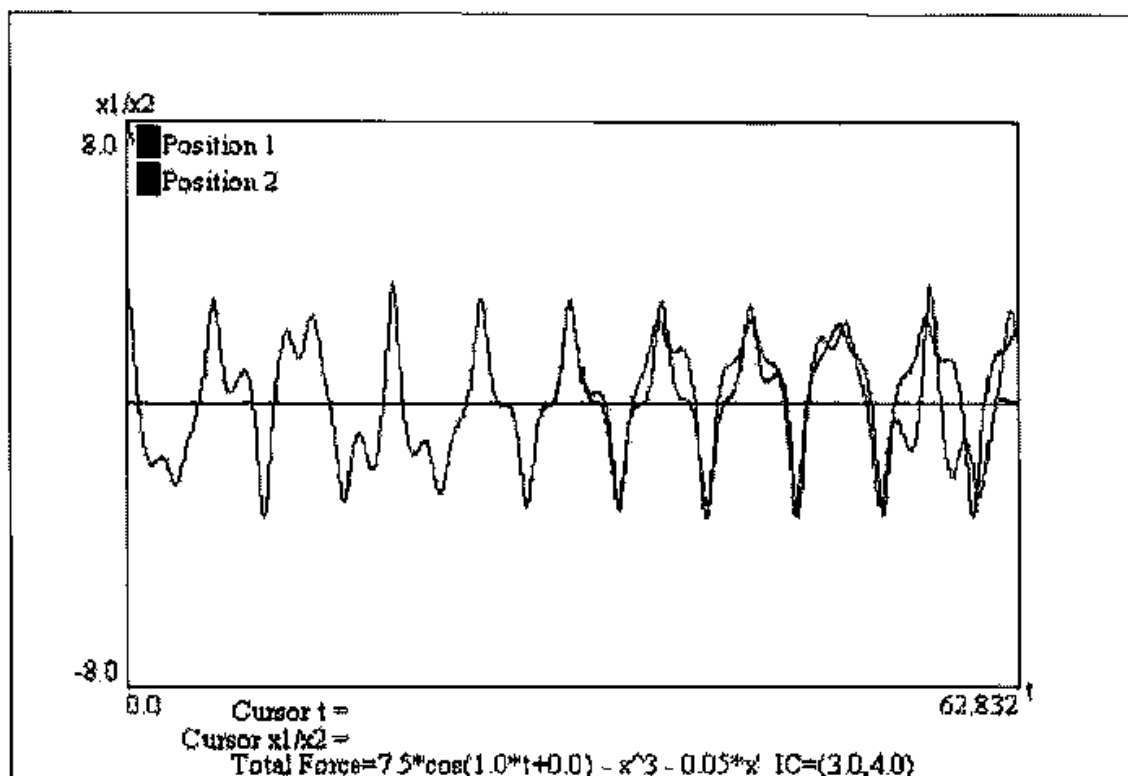


图 7.53 达芬方程的混沌状态对初始条件的敏感性

气候变化分叉点上的蝴蝶确实会有这个效应。蝴蝶效应并不单纯是一个“隐喻”，它是一种严格计算的结果。科学家大卫·吕埃勒 (David Ruelle) 在 1991 年出版的一本名著《机遇与混沌》一书中讲到：假定在宇宙的边缘上有个小妖精使一个电子只在某一瞬间停止了它的引力效应，你当然不会注意到会有什么事情发生。可是，即使你从经典分子动力论的角度来考虑这个问题，也会想到这个引力效应的改变会引起空气中分子运动初始条件的变化。若要



爱德华·洛伦兹 (Edward Lorenz)

问要多少次分子碰撞会因这个效应而漏碰了一个分子，经计算只需 50 次碰撞就足够了。如果有宇宙边缘的一个电子的引力效应，它就碰上了。可是现在变得没碰上，这样一秒钟之后，空气中分子碰撞的情况就已经变得完全不同了，当然，你也许不会察觉这件事。但是如果这时空气恰好处于湍流的

状态,只需要一点点的风,即小的涨落就会产生毫米级的宏观效应,所以一分钟之后,湍流的结构已经完全不同了。我们可以根据柯尔莫哥洛夫理论进行计算,几个小时或一天之后,由于这个小妖精略施小技,就会引起大气湍流在千米尺度上发生变化:云的形状、风的阵发形式都变得完全不同。几周之后,这个小妖精的那一点点的活动,即前面所说的在宇宙边缘上停止一个电子的引力效应一会儿,就会引起全球天气的变化。假若这时正好是周末,你和女朋友出外野餐,正好在草地上铺开桌布的时候,突然一阵大冰雹将你们打得头破血流,或者甚至使你们在回家的路上被弄得汽车失事,这就成了有关混沌系统对初始条件的敏感性的一个生动例子。^①

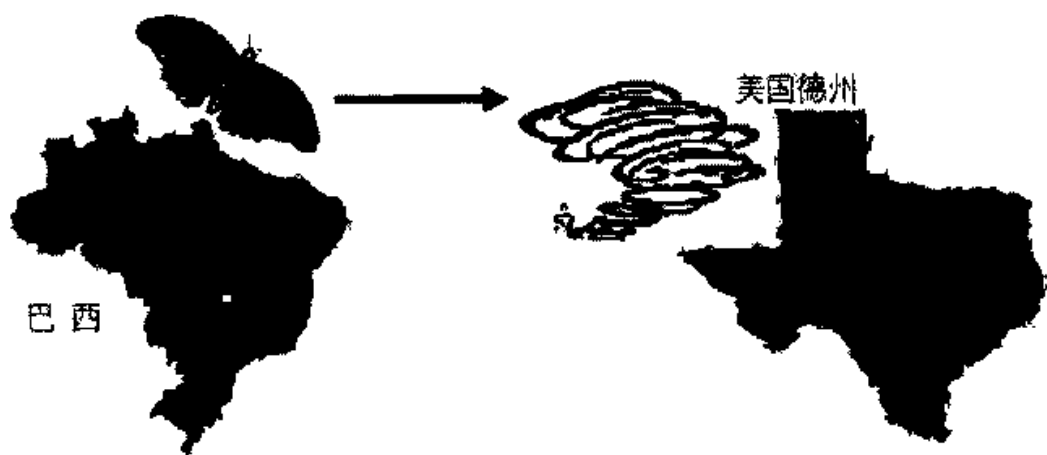


图 7.54 蝴蝶效应

混沌系统的第四个特征就是它的吸引子的区域性和历遍性。吸引子之所以被称为吸引子,就是当干扰使动力系统的状态离开吸引子时,系统很快就会返回原吸引子的状态。点吸引子和周期吸引子都具有这种特征。同样,混沌吸引子也具有同样的效应,所以它还是称得上是名副其实的吸引子。所不同的是:处于混沌吸引子的系统受干扰之后,我们不可以预言它返回未受干扰状态时的那一个瞬时值,我们只知道它返回吸引子区域的某个地方,所以混沌吸引子的特征是区域性的,不是极限点(点吸引子),也不是极限环(周期吸引子),而是相空间中的一个区域。它将返回吸引子的区域

^① 大卫·吕埃勒:《机遇与混沌》,刘式达、梁爽、李镇林译,上海科技教育出版社 2001 年版,第 74—75 页。

是完全确定的,但在该区域的哪一个地方则是不确定的。并且系统在吸引子的域中运动,其相空间的轨线不会有两次达到同一个位置和速度。只要时间足够地长,这些轨线可以历速所有的空间。这就是混沌吸引子的历遍性。图 7.55 说明了混沌吸引子的区域性,图 7.56 说明了混沌吸引子的历遍性。

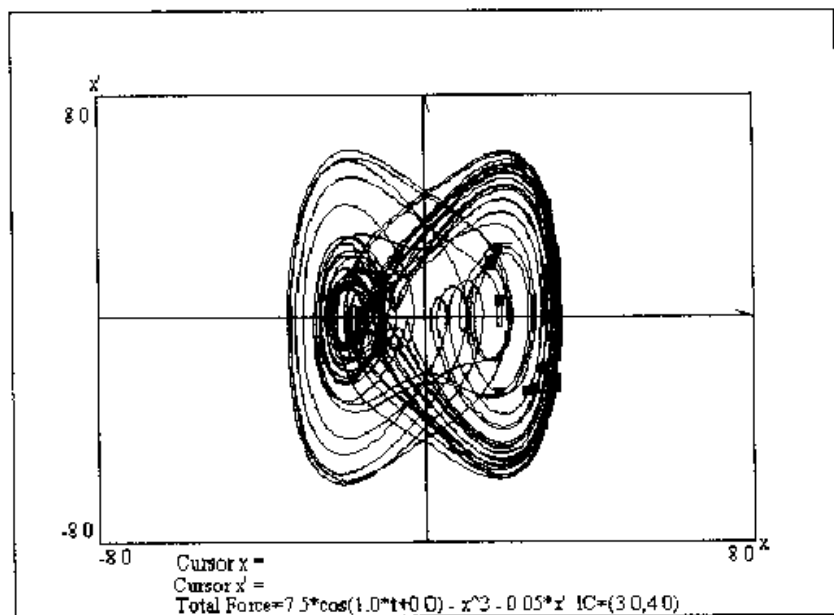


图 7.55 混沌吸引子状态轨线的区域性

所谓历遍性在数学上是这样一个概念:若状态轨线在吸引子范围里经过一个点,用这个点来定义一个邻域,如果系统在这个区间是历遍的,则距该点无论怎样小的距离,系统总将存在一条轨线通过这个区域。不过我们在此特别要指出,这条轨线在有时间轴的相空间中与任何轨线又是不相交的;如果相交了,就意味着它返回原先的状态,而混沌系统的第一特征就是它是不可重复的。混沌吸引子的区域性和历遍性可以这样来例解:就像天气一样,它意味着将来总有一天的天气与你所经历的天气几乎一样,但却又是不相同的。这正如古希腊哲学家赫拉克利特所说的那样,“一个人不能两次踏进同一条河流中”,混沌科学以严格的数学形式证实了古代圣哲的这个至理名言。混沌吸引子的相空间像一束线团,它容纳了无限长的线,却又被压缩到只占着非常有限的吸引子区域的容积里,而且这些线永不交叉,也不打结。这件事在直观上好像是矛盾的,事实上并非如此,就像在分形几

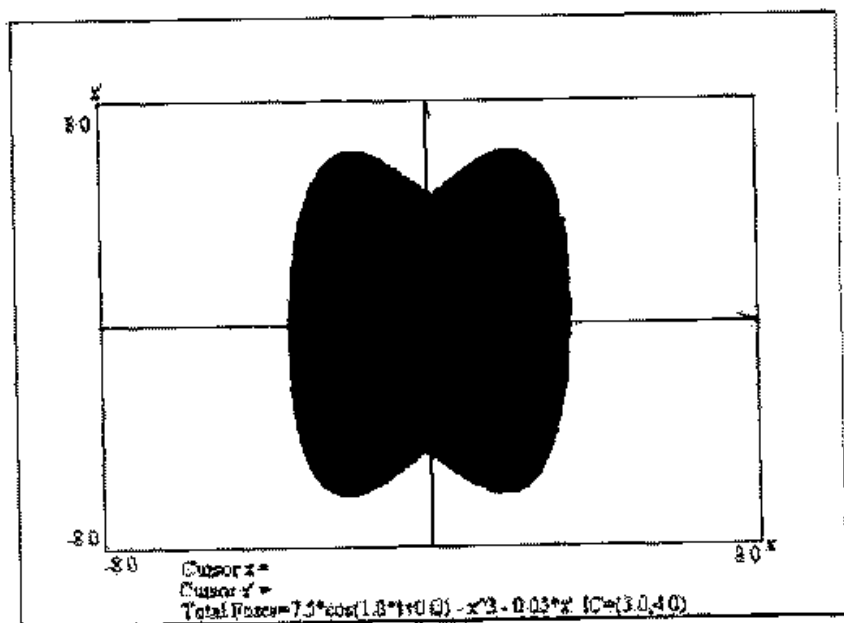


图 7.56 混沌吸引子状态轨线的历遍性

何中我们看到皮亚诺曲线一样。皮亚诺曲线是线,但有两个维度,我们同样可以认为混沌吸引子中的状态轨线是线,但它却有三个维度,从混沌与分形的观点看是不矛盾的。图 7.57 说明了混沌吸引子的状态轨线束。

混沌吸引子的第五个特征是其有内部结构。有人对混沌有一种误解,认为系统处于混沌之中,它是没有规律的,其实情况并非这样。对混沌吸引子的三维相空间状态轨线进行截面分析表明,混沌吸引子并没有占领它的轨道环所在的全部相空间,相反地,却呈现出一种旋转式的层次,说明它是有内部结构的。图 7.58 说明了这种横截面的图景,而图 7.59 则说明了混沌吸引子的内部结构。

混沌吸引子的内部结构说明混沌系统的不可预测性只是一定范围或一定程度上的不可预测性,因而同样说明了在一定范围或一定程度上的可预测性。

现在让我们略为返回刚才提到的那个哲学难题上来。混沌系统是决定论的,并且它在某种意义上是有序的和有内在结构的,但同时却是不可预测的。这个论证与 18 世纪的决定论大异其趣。它使我们想起 18 世纪法国天文学家拉普拉斯对宇宙决定论的一段最为鲜明的表达。他说:“我们把宇宙的现在的状态看做是它先前状态的结果,随后状态的原因,暂时设想有

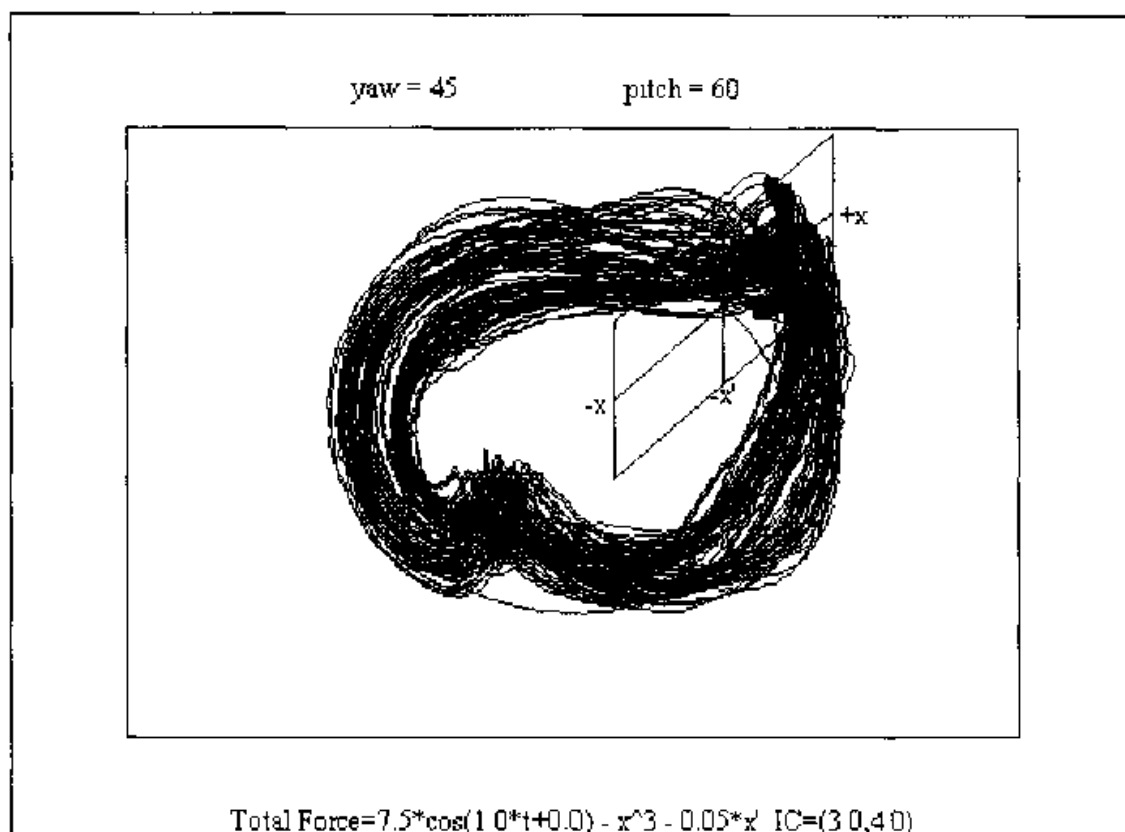


图 7.57 混沌吸引子中的状态轨线束

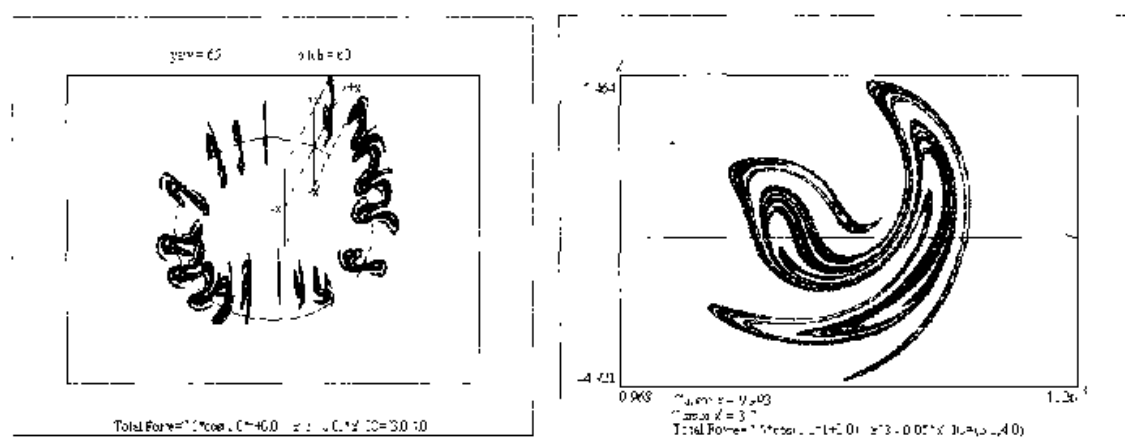


图 7.58 混沌吸引子的横截面图

图 7.59 混沌吸引子的内部结构

一位有超人的智力的神灵,它能够知道某一瞬间施加于自然界的所有作用力以及自然界所有组成物各自的位置,它并且能够广泛地分析这些数据,那么它就可以把宇宙中最重物体和最轻的原子的运动,均纳入同一公式之中。对于它,再也没有什么事情是不确定的,未来和过去一样,均呈

现在它的眼前。”^①即过去和未来的一切都是精确地可以预测的。现在我们看到,混沌系统和拉普拉斯系统的第一个前提都是一样的,为什么结论会完全相反呢?拉普拉斯论证的错误不在于它的结论,而在于它的第二个前提,即这个神灵能知道某一瞬间施加于自然物体中所有的力和初始条件,这是不可能的,这不仅是因为任何智能主体的认识能力都是有限的,而且是因为在物理学上,量子力学证明,客观上存在着海森堡的“测不准原理”(测不准关系是一个不准确的英语译法,准确的译法应译为“非确定性关系”,即德文的 Unbestimmtheit)。而在数学上,无理数与无穷小数是不可精确计算的;加上混沌系统对初始条件的敏感性,这就必然产生对未来的不可精确预测性。因此混沌科学表明,原来有许多被认为本质上是随机性的现象,事实上是决定论现象的不可预测性。这就引起我们要对必然性与偶然性的关系、决定论与非决定论的关系做重新认识。

① 转引自张志林、张华夏主编《系统观念与哲学探索》,中山大学出版社 2003 年版,第 134 页。

第四编
复杂系统分论

第 8 章

系统进化控制论

从本章开始讨论复杂系统分论,即分别讨论几种不同类型的复杂系统。这几种类型是按照它们的主要机制进行划分的。复杂系统的运作及其组成、结构、功能的进化发展,有三种机制是最为重要的,这就是:控制机制、自组织机制和适应性机制。对应着这三种机制,有三种不同的复杂系统模型:(1)多层级控制系统模型。(2)自组织系统模型。(3)复杂适应系统模型。复杂系统的多层次控制模型由美国 V. 图琴和 W. 鲍威斯于 20 世纪 70 年代首创,由当代比利时布鲁塞尔大学 F. 海里津等人加以发展。他们称这个理论为系统进化控制理论。复杂系统自组织理论模型,由比利时 L. 普利高津和德国 H. 哈肯等人于 20 世纪 70 年代首创,许多科学家在这方面做了大量工作。复杂适应系统理论主要是在 20 世纪 80 年代由美国圣菲研究所一批科学家通过跨学科研究而创立。M. 盖尔曼、J. H. 霍兰、S. A 考夫曼等人做了大量的工作。本章着重介绍复杂系统的层级控制理论,即系统进化控制理论。

在第 4 章中我们已经讲过,由于对系统的各种复杂的环形因果关系(反馈)及其相关的控制机制的研究,产生了控制论。控制论提供了研究复杂系统的根本方法。控制论给研究复杂系统提供了“一整套统一的词汇和概念”,以便进行跨学科的研究,“建立各个学科之间的准确关系”;控制论又摒弃了一次只改变一个因素的单纯分析方法,而采取了整体的综合方法和功能方法来弥补分析还原方法之不足,所以它对复杂系统研究较为有用。控制论创始人之一艾什比讲过:“对于那些以复杂著称而其复杂性不容忽视的系统,控制论给出了一种新的科学研究方法”;“研究复杂系统的种种

方法里,控制论是数一数二的”。^① 法国思想家埃德加·莫兰写道:“控制论远不是机械式化简的认识模式(像我过去认为的那样),相反地是通向复杂性研究的阶梯”。^②

再来看看控制论与系统的层次突现的关系:我们在4.2.4讲过,系统学家和经济学家西蒙运用概率的方法分析系统组成元素的随机组合的概率,指出了并从数学上证明了自然界之所以存在着系统的等级层次,是因为等级结构体的生存概率远远大于非等级层次结构体的生存概率。但为什么会是这样,以及为什么会是由低层次跃迁到高层次、由单层次跃迁到多层次的呢?这里有一个控制机制问题有待于分析,这是本章的任务之一。

现在我们还要进一步分析控制论研究与生命系统研究之间的关系。控制论的研究本来起源于工程科学的研究和神经生理学研究之间的结合,1948年发表的维纳《控制论》一书的书名副标题就叫做“关于动物和机器中控制和通讯的科学”,但控制论后来却着重向工程控制论和系统工程方面发展,出现了研究伺服机器的工程控制论、忽视了生物学、而理论生物学(包括M. 艾根的超循环理论,L. 普利高津的探索复杂性以及F. 华里拉的自创生理论)又忽视了作为生命本质的基本控制机制的局面。20世纪70年代,在系统科学和复杂性的研究中,出现了控制论研究的两个重大成就,一个是图琴的《科学的现象》(1977)一书的出版,提出了元系统跃迁的理论;另一个是W. 鲍威斯《行为:感知的控制》(1973)一书的出版,提出了感知控制论。这两个理论基本观念相同,就是将工程控制论和理论生物学重新结合起来,强调复杂系统的目的性和层级进化,将一切复杂系统、一切生命有机体及其组成的系统——从最原始的机体到社会文化现象,都看做是层级地组织起来的信念—愿望控制系统,并控制着环境的某些变量。这两个控制理论由于创立了一些新概念来强调和解释复杂系统的目的性;由于它们比维纳的控制论更精确地解释了控制过程,建立了控制关系的新图式;特别是由于它们解释了生命系统以及其他复杂系统的层次突现进化,因此我们赞成F. 海里津的意见,称他们的控制论为新控制理论或进化的控制理

① W. R. 艾什比:《控制论导论》,张理京译,科学出版社1965年版,第6页。

② 埃德加·莫兰:《迷失的范式:人性研究》,陈一壮译,北京大学出版社1999年版,第6页。

论。本章将要讨论这个系统进化控制论。

►► 8.1 控制与元系统跃迁

▷▷ 8.1.1 控制系统

下面我们依据图琴和海里津的理论提出控制系统的最为一般的定义。在8.3中,我们将依据鲍威斯理论对这个一般概念做出具体化和精确化的说明。首先,我们来看下列图式:

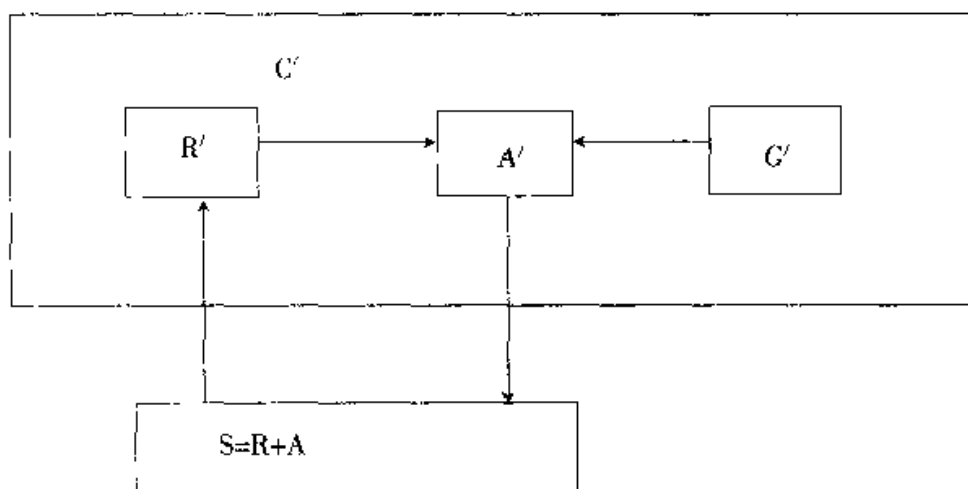


图 8.1 控制系统图

这是控制系统的最一般图式。

1. 控制系统的组成

控制系统由控制者系统 C' 与被控系统 S 组成,这里,被控系统划分为两个部分:

A —Agent,行动者,体现了系统中的活动与作用方向,起主动的作用。

R —Representation,表现,代表着多少带有某种被动性的客体或现象,它是行动者作用的表现和结果。

控制者系统,也是由行动者与表现组成,附加第三个子系统 G —Goal,代表控制者系统的目标。这里表现 R' 的意思更加明显,它是一种模型,表现了或感知了 S 的一种被观察的变量。



图琴(V. Turchin 1931—)

在控制系统中有一些关系的范畴用箭头 $\rightarrow$ 表示,它可以理解为因果关系,即箭头的前者对后者施加一定的影响,这种影响作用包括物质的、能量的或信息的作用。

图琴给控制系统做出这种简化的定义,有他的世界观根源:他认为整个世界本质上就是行动加表现。行动就是行动者的一种活动作用,是一种终极的存在。其他一切现象、客体不过是活动作用的表现。^①他将系统定义为“行动者与客体对象的一个集合。因此,它是一种复杂的表现。”

他说:“有人常把系统定义为诸种客体和它们之间的关系的集合。用我们的话说,那些客体会是一些被动的表现,而这些关系将被视为这些行动者,它发动这样的过程,这些过程决定是否有一种关系成立。”^②

2. 控制系统的机制

控制系统 C' 中行动者 A' 施加一种作用约束着或影响着被控系统 S 中行动者 A 的活动,而 S 有一种作用加于 R' , R' 是 S 的一种表现。这个表现 R' 又作用于 A' , 这样便构成了一个因果环,它就是控制论中所说的一种反馈。我们需要注意的是,这个因果环是不对称的, A' 对 S 的影响是直接的,是动力学的,而 S 对 A' 的影响是间接性的,是通过过滤器 R' 进行的, R' 许可到什么程度, S 对 A' 的影响就达到什么程度。

控制系统的典型实例是有机体 C' 控制环境 S , 即 $A' \rightarrow S$, 并从环境的表现中获得有关信息,即 $S \rightarrow R'$, $R' \rightarrow A'$, 控制行动者 A' 将 R' 与 G' 相比较做出新决策行动 $A' \rightarrow S$, 以达到它的目的 G' , 就是这样一个生命自我控制、自动调节的过程。动植物有机体的内稳态(Homeostasis)以及对环境的适应就是控制系统的典型例子。

① 图琴的哲学思想来自 A. 叔本华(1788-1860)的意志哲学和 A. N. 怀特海(1861-1937)的过程哲学。见叔本华《作为意志和表象的世界》(商务印书馆1982年版, §17, §18); A. N. 怀特海《过程与实在》(中国城市出版社2003年版,第十章)。意志哲学和过程哲学都认为,活动与作用、过程与关系比起实在的具体事物更加本质和更加优先。

② V. Turchin, "A Dialogue on Metasystem Transition", The City College of New York, July, 1999, p. 15.

▷▷ 8.1.2 元系统跃迁

所谓元系统,就是由被控系统 S 与控制者系统 C' 组成的新系统 S' ,即 $S' = C' * S$ 。这里 S 通常有一种方法复制自己,就像细胞可以进行分裂复制产生更多同样的细胞一样,所以 S 是一个系统的类,由 n 个系统 $S_1, S_2 \cdots S_n$ 组成。 C' 是什么? 它代表一种控制机制,不但能控制 S_1 的功能,而且控制 S_1 的繁殖。 S' 是什么? 它是一个新的突现系统,不但创造了新的结构,如多细胞或组织与器官,而且创造了一种新的活动类型和作用方式 A' , 不同于 S 的活动类型。 A' 叫做突现的新层次的活动,叫做倒数第二层活动。因此,元系统的精确具体的定义是 $S' = C' * (S_1 + S_2 + \cdots + S_n)$ 。事实上我们在上面讨论的控制系统,对于其中的被控制者系统来说,都是一种元系统。

所谓元系统跃迁,就是由 S 转变到 S' ,即 $S \rightarrow S'$,或

$$S \rightarrow [S' = C' * (S_1, S_2, S_3, \cdots, S_n)]$$

这叫做结构上的跃迁。其行为方式的跃迁为:

$$A' = A \text{ 的控制}$$

这叫做功能上的跃迁。这里跃迁的范围(scope)是原系统 S ,整合的测度(scale)就是数量 n 。图 8.2 便是一个元系统跃迁图。

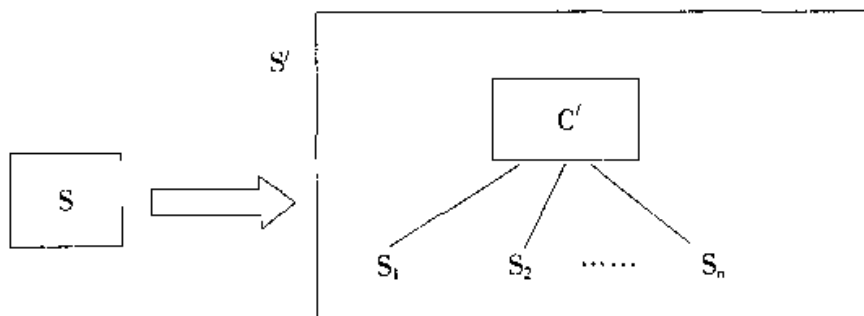


图 8.2 元系统跃迁

这里我们需要区分元系统跃迁的不同测度。依元系统跃迁的幅度或测度不同,元系统跃迁可以分为两类:

1. 系统 X 内部分子系统 W 进行元系统跃迁。其图形如下:

这里 w' 代替了 w , 相对于子系统 w , 它是一个元系统跃迁, 但 w' 在系统

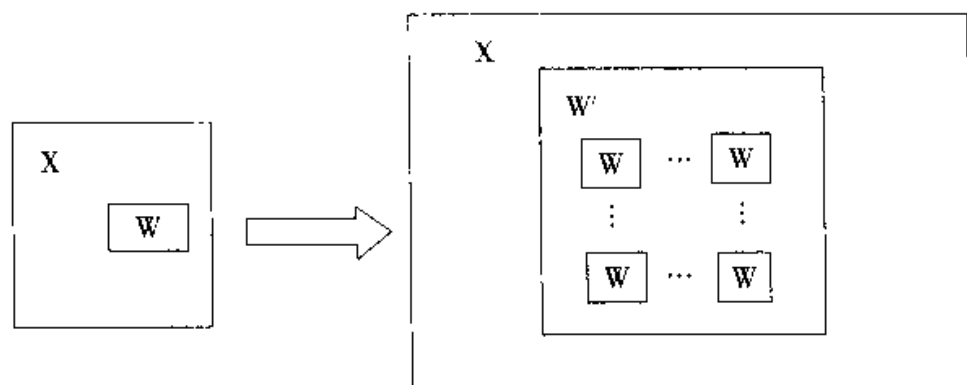


图 8.3 系统内元系统跃迁

X 中实现了 w 原来实现的功能,而且也许实现得更好。由于 w 在 X 中起到主导的重要作用,在进化过程中 w 跃迁到一个更高的阶段就对 X 的发展起到非常重要的作用,在后面我们讨论进化时会充分看到这一点。

当然系统内元系统跃迁也可能有另外一种情况,即系统中某些低层次组织发生元系统跃迁。其图形如下:

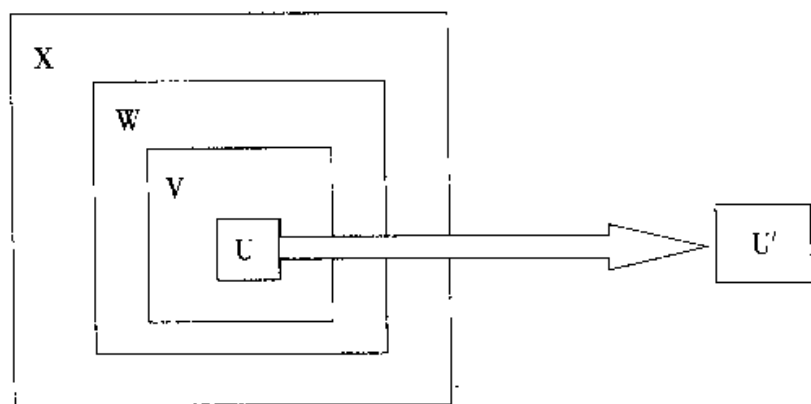


图 8.4 低层组织的元系统跃迁

假定 W 是 X 的一个子系统, V 是 W 的一个子系统,而 U 又是 V 的一个子系统,则元系统跃迁 $U \rightarrow U'$ 极大地改进了 V,从而也极大地改进了 W。不过由于 W 在 X 中并不起决定作用,因而对 X 的进化改进不是太大。但无论如何,这也是元系统跃迁促进进化的一种力量。

2. 还有一种元系统跃迁,涉及到整个系统 X 的所有子系统,这就是整体性的元系统跃迁。如社会的突现是它的所有子系统个人的元系统跃迁。

下面我们将会看到这个跃迁具有阶段性的关键意义。

元系统跃迁理论是从研究物质系统的进化中、特别是研究生物与人类发展的机制中发现的。它是一种进化的控制理论,用进化的观点说明控制层次从单层到多层、从低级到高级、从简单到复杂的发展。它同时又是一种控制的进化理论,用控制论说明系统突现进化的机制。图琴在《科学的现象》一书中写道:“我们必须运用一般控制论的术语来总结我们研究早期进化机制的结果。沿着这个方向,我们容易发现从较低阶段到较高阶段的跃迁转变的一个一般特征,这就是:在每一个阶段,生物系统有一个被称为最高控制装置的子系统;它是最近产生并有最高组织水平的子系统(即图 8.2 中的系统 C' ——作者)。而向下一个阶段的跃迁是通过这些系统的繁殖,并形成一个控制系统、即新的子系统将它们整合成一个单一的整体,这个新的控制系统成为进化新阶段的最高控制装置。”^①于是我们就称由新控制系统 C' 与它所控制的子系统 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 所组成的系统 S' 为相对于 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 的元系统,而由 S 变到 S' 为元系统跃迁。英国系统科学家切克兰德在《系统的思想与实践》一书中曾指出:“系统学家需要发现一个新词来指称那对于低一层次来说是结构整体、而对于高一层次来说是组成部分的那个东西,那个实体,它集中表达了系统的基本性质和层次的基本性质,杰拉德(R. W. Gerard)于 1964 年称它为组织子(Orgs),凯斯特(A. Koester)于 1978 年称它为整体子(holons),而雅可布(F. Jacob)于 1974 年称它为整合子(integron)。”^②他们显然不知道图琴于 1977 年称它为元系统和元系统跃迁。看来元系统跃迁比组织子、整体子和整合子更有解释力,因为它说明了系统进化的机制。纽约大学系统科学系 C. 克勒尔在他的《系统科学概论》中写道:“(不同序列的)元系统,对于把握包含变化的系统现象,例如适应性、自组织、形态发生、自创性、进化等是十分重要的,例如进化就是通过从低阶元系统到高阶元系统的跃迁而概念化了。”^③这就是说,元系统跃迁是

① Valentin F. Turchin, *The Phenomenon of Science*, New York, Columbia University Press, 1977, chapter 3, p. 1.

② P. 切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 103 页。

③ G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2001, p. 80.

进化的量子,系统进化是元系统跃迁的阶梯。

持续的元系统跃迁,便创造了控制的层级,在这里控制者在跃迁中被控制,于是 C'' 控制 C' , C' 控制 $S = R + A$ 。

这里有两个信息流:(1)表现信息流: R' 是 R 的表现, R'' 是 R' 的表现, R 是环境的表现等等。(2)行动信息流, A'' 控制着行动者 A' , A' 控制着 A ,以图实现 G' 。(3)行动信息流包括高层次目标控制子层次目标,创造一个目标体系。其图形如下:

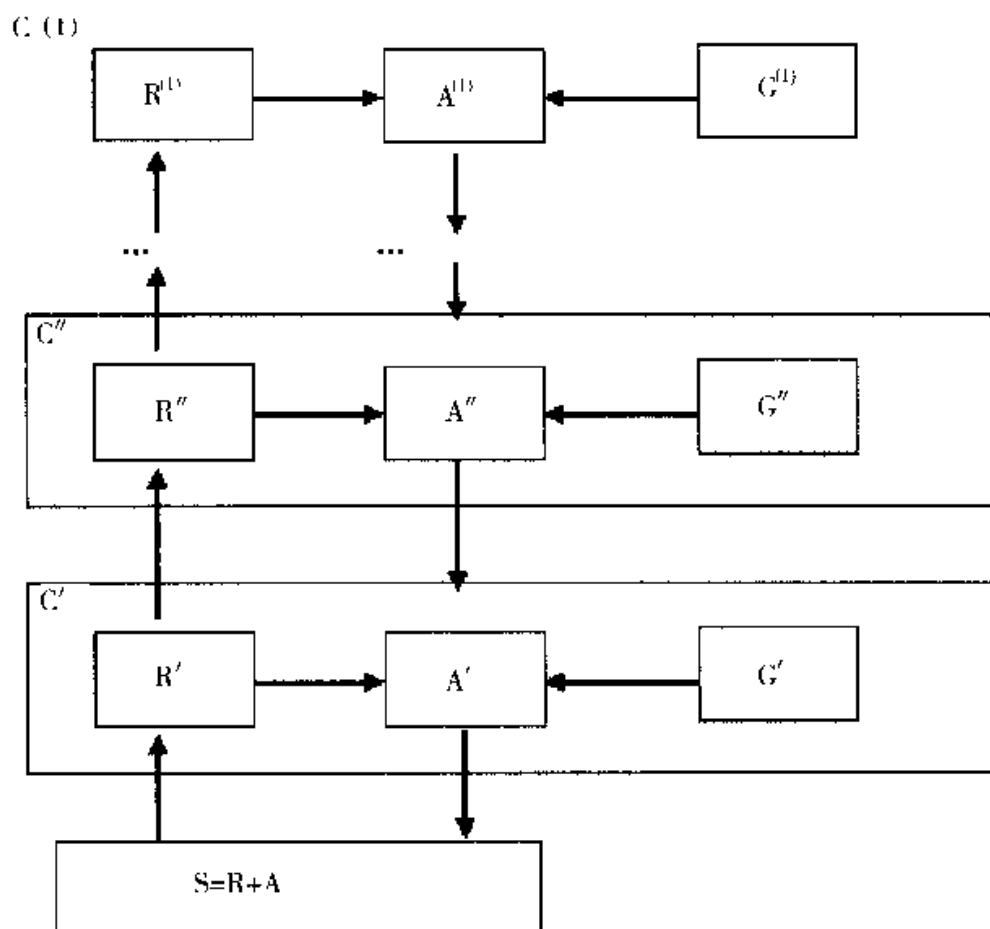


图 8.5 元系统跃迁导致的控制层级结构

►► 8.2 进化的阶梯与倒数第二层分叉增长规律

我们在第 4 章中已讨论了微观世界中夸克、基本粒子、原子核、原子、分

子、大分子、生命大分子这些层次,又讨论了宏观世界中宏观物体与物态、行星、行星系统、恒星、星团、星云、星系、星系集团这些层次及其进化,并用自然选择的规律与西蒙和罗森(R. Rosen)的概率分析对它们的必然性和可能性做了解释。另一方面,我们已在本书第2章中对系统自组织理论中对耗散结构的现象和复杂适应系统理论进行了初步介绍,指明它们的自组织机制。本节则将对典型的复杂系统,如生命的起源系统、多细胞系统、动物与植物、人类心灵、社会的突现这些多层次控制系统及其层次的进化做出较为深入细致的分析。

▷▷ 8.2.1 进化的阶梯

元系统跃迁理论补充了对复杂系统自组织的机制和对环境的适应性机制的探讨,对复杂性进化的阶梯做出了较好的解释。如果撇开生命起源这样的核苷酸与蛋白质(酶)的合成控制不谈,元系统跃迁决定了下面将介绍的几个主要进化阶梯。生物世界的典型控制系统是动物的下述系统,其形式如下:

1. 简单反射阶段,即所谓水螅阶段

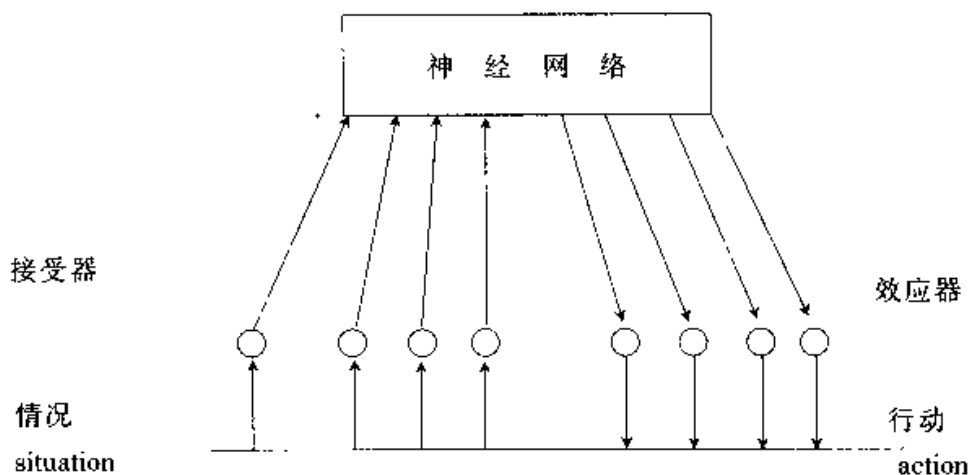


图 8.6 典型控制系统

但在简单的反射阶段,控制者尚未形成神经的网络,它由独立的神经细胞来承担,因而神经刺激的接受器与神经的效应器直接联系在一起,所以被

称为简单反射。一切腔肠动物的简单反射就属于这个阶段。但对于没有自感受行动的原始植物阶段来说,它的出现是一个元系统跃迁与突现。突现了什么?突现了神经的控制。请看水螅的解剖图。

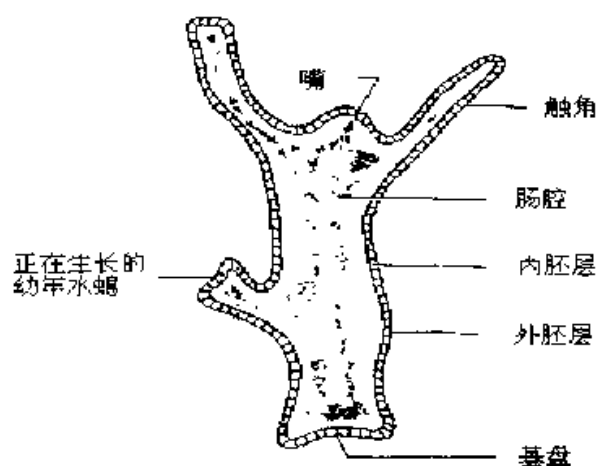


图 8.7 水螅的结构

水螅的内腔肠通过嘴而与环境接触,在嘴的四周围有触角,腔肠壁由内胚层与外胚层组成,二者都有许多肌肉细胞。这些细胞包含细小的纤维,可以收缩,由此引起水螅身体的运动。这些肌肉就是一种效应器。在水螅的外胚层,有神经细胞布满于表皮,亦有一些深藏在皮层内部,这就是接受器。

如果用针刺一下水螅,它的神经细胞受兴奋刺激,立即直接传递到肌肉纤维,引起水螅蜷缩成一团,这就是神经细胞群控制行动。

如果遇有食物,触觉神经细胞首先有反应。水螅的触觉是很敏感的,它的触觉立即将食物包围,塞进口中。

这里已有了一个元系统机制,见于图 8.5。S 是被控制的环境,R'是神经细胞感受器,A'是肌肉纤维。这个元系统跃迁可以表述为:

细胞 - 兴奋 = 行动的控制

2. 复杂反射阶段

由于生存竞争以及后面图琴要讨论到的倒数第二层分叉增长规律的作用,越来越多的单细胞聚集成多细胞的有机体,出现细胞功能的分化和专门化,特别是有许许多多感受器,又有许许多多效应器,于是在二者之间产生了复杂的神经网络。从接受外界刺激到受动细胞的行动之间要走很长的通

道,要经过信息的传递与处理才能到达行动的激发,这种过程叫做复杂反射。具有复杂反射的生物的突现是元系统跃迁的新阶段,也就是图琴称为蚂蚁的阶段。在这阶段里,产生了一个新控制系统:(1) R'' 是由专门化的神经细胞承担;(2) A'' 是由专门的受动细胞负责;(3)由 $R''-A''$ 有很长的中间通道进行复杂反射,它是通过一个神经网络来进行的, R'' 与 A'' 进而到 A' 没有一个直接的联系。这时效应器的兴奋不是由环境的直接的刺激来决定,而是由环境的刺激以及特殊的目标二者共同决定的,例如蚂蚁遇到食物,并不是像水螅一样,即时将它包围吃掉,而是通知其他蚂蚁群,集体行动,一齐搬到洞里藏起来,留到冬天再吃。

这时细胞兴奋受到控制,不是细胞兴奋直接与效应器相联系,所以:

反射 = 细胞兴奋的控制

为了说明这个复杂反射的必要性,图琴首先分析了简单反射存在的问题:假定一个有机体有 n 个感受器与 n 个效应器直接相联,每一个感受器和每一个效应器都有两种可能的状态(兴奋或抑制),于是 n 个感受器就有 2^n 个不同的兴奋抑制的状态组合,而 n 个效应器也有 2^n 个不同状态的组合。于是将感受器群与效应器群进行配对以决定行动就有 $(2^n)^{2^n}$ 种不同的状态组合,即有 $2^{(2^n)^n}$ 个状态数目。根据图琴计算,如果 $n=100$,则感受器与效应器的联系方式有 $2^{(2^n)^n} \cong 10^{(10^{32})}$ 种。怎样从这天文数字中选出有利于生存的少数的联系方式?人工选择是不可能的,自然界进行筛选也是不可能的。正如我们在上一章已经看到的,它要处理的信息量远远超出了本书6.4所说的布莱曼极限,即 10^{93} 比特。解决这个悖论的方法就是建立控制的层次结构,这就导致了神经网络的突现。因为按照A. 奥林的必要的层级定律,“调节与控制能力的缺乏,可以在一定程度上用增加组织来补偿”(见4.2.4)。按图琴要处理比特的信息量计算,如果分成两层,若第一层每个系统处理 $10^{10^{32}}$ 比特的信息,则第二层只须处理 10^{32} 比特的信息。

3. 高级动物阶段(又可称为狗的阶段)

如果反射是 $R'A'$ 的有序对的集合,即 $\{(R'_n, A'_n) | n=1, 2, \dots, n\}$,则狗的特点是:(1)它可以将表现 R' 与碰巧可以增强狗的生存能力的行动 A' 联系起来。这种关系并不是本能的、天生的无条件反射,而是经过学习而得到的条件反射。更一般地说,它是联想,通过联想保持在记忆中来总结

狗的生活经验所获得的联系。(2)如果狗可以将表现 R 与行动 A 不是天生地而是后天获得地联系起来,那么我们会很自然地假定,它也可以将反射的感受——行动一个接一个地连结起来,例如将 $R'_1A'_1$ 与 $R'_2A'_2$ 联系起来,即存在一个有序四元组 $R'_1A'_1R'_2A'_2$,而对于行动 A'_2 来说, $R'_1A'_1R'_2$ 是一个有序三元组,它是导出行动 A'_2 的世界模型。

如果 $(R'_1A'_1R'_2)$ 是一个在情况 R'_1 下采取了行动 A'_1 却错误地预言结果 R'_2 、即那些随之而来的 A'_2 总是落空,则总是给狗带来一种消极情绪。经过若干次这种失败, $(R'_1A'_1R'_2)$ 的 $R'_1A'_1$ 联想便在记忆中消失,而那些做出正确预言的三元组联想 $R'_1A'_1$ 便会在记忆中保留下来。如是摇铃 R'_1 引起狗采取奔跑到狗钵子那里去的行动 A'_1 ,随后看到食物 R'_2 便有进食的行动 A'_2 ,它总引起积极情绪,从而使联想 $R'_1A'_1$ 保留在记忆中;而如果每次摇铃都不给狗以食物,以后摇铃和奔跑之间的反射就不出现了,所以:

联想 = 反射的控制

这是生物进化的一个重大突现。

4. 人类阶段

人类最根本的突现,就是制造工具、创造语言、能对联想进行控制。用一个公式来表示,就是:

思维 = 对联想的控制

这不是一个关于大脑结构及其运作机制的研究,科学在这方面的进展极为缓慢,我们在这方面了解得很少。这是一个解释人类思维现象的功能公式。

什么是联想的控制呢? 动物对表象 x 与 y 也有联想,不过它是要在经验中一起出现才能发生,如它们不是一起出现就没有联想,所以联想是环境加给它们的。但人类可以自由地对他们的表象进行联想,尽管环境与经验并不将它们联结在一起。龙卷风将许多美元吹落到一个人的屋顶上,狗是无法将它们取下来的,但人的思维有办法,他首先将邻居的梯 R'_1 与借梯的行动 A'_1 以及放梯在屋檐下的表象 R'_2 联系起来,又将屋檐下梯子的表象 R'_2 与爬梯的行动 A'_2 联系起来,再与取得美元的表象 R'_3 联系起来。当然,一种自由的联想,经过试错的筛选,便成为一种思维,它是对世界状态间接的概括知识,即构成一种思维的模型。播种时如将最好吃的东西丢掉了,环境加给动物的联想或反射必定是吃掉这些种子(例如红薯),但人类的思

维却控制着这种联想,而将播种与收获这些表象联系起来。

许多高级动物也有思维的萌芽。一只狗经过训练,能够将一条板凳(R_1)拖到(A_1)篱笆的旁边(R_2),并从板凳上(R_2)跳过(A_2)篱笆获取食物(R_3)。这里分别有两个三元组(R_1, A_1, R_2)、(R_2, A_2, R_3),狗的联想可以分别做这两件事。但没有奖赏的训练,它不会将二个三元组联系起来,形成(R_1, A_1, A_2, R_3)的模型,因为它没有将 A_1 行动与 A_2 行动相联系的想像。人与动物的一个重要区别就在于人类具有想像力,从而使他们能控制联想以达到自己的目的。

正是具有想像力使人类能制造工具,也正是想像力使人类能有计划地行动。先采取行动 A,然后采取行动 B,再采取行动 C,最后达到目标 G。即 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow G$ 。这种行动链在高级动物中也有,但它们是本能的,而人类的行动链是自己创造的。

人类控制联想的能力,即人类的思维和想像的能力通过语言而巩固起来。图琴在《关于元系统跃迁的对话》一文中曾经讲过原始人侦察敌对部落人数的情形,如果没有语言文字,包括手势语言,有 3 个敌人走进洞穴,2 个敌人走出洞穴,原始人还会知道有 1 个人留在洞穴里。但是如果有 25 个人走进洞穴,又有 14 人走出来,洞穴里还有多少人,原始人对此没有任何分辨力。即使在今天我们仍发现,在世界上现存的原始部落里,他们的数字概念只有 1,2,3,超出了这 3 个数字就是“许多”了。他们有多少个数目字呢? 4 个数目字:1,2,3,多。随着数字语言的发展,人类分辨了越来越多的数目,而随着其他语言的发展,人类分辨越来越多的事物。而运算的法则,如 $2+4=6$,对应着大脑中数字概念间的联想,思维的推理对应着大脑中概念之间的联想。正是语言本身发展了大脑中的联想,控制着大脑中的联想。于是语言成为大脑的延长,正像工具是人手的延长一样。

5. 社会的整合

大脑结构的元系统跃迁,即控制联想的元系统跃迁,产生了一个新的过程,这就是将个人整合为社会整体的过程。整个人类历史都在社会整合的旗帜下向前发展。直到今天,人们之间的相互关系无论在数量上还是在质量上都在不断发展,没有人能预料这个整合的过程将会走多远。

社会整合是一个元系统跃迁,它导致物质组织的一个新的层次,我们可以称这个层次为社会圈(social sphere)。动物世界也有社会组织,也是一个

元系统。例如蚁丘,它可以看做是单一的生命有机体,有严格的专业分工,单独的蚂蚁离开了它不能生存;不过它们是低功能的,没有进一步发展的可能性,它是生物进化发展中的一种死胡同。

但是由联想的控制以及语言的出现导致的人类社会整合的元系统跃迁,是物质进化的一个新阶段。有两种物质组织的层次:动物层次,它的最高规律就是自我保存和进行繁殖的本能;人类社会的层次,它是人们通过大脑的联系而形成的,是人类自身创造的社会组织。在此之前,发展是通过生存竞争和自然选择而缓慢进行的。而现在,发展是通过语言文化发展的结果,“不断增加物质组织复杂性的多样性,这种试错的必要选择,现在通过人脑来进行”^①,“发生在大脑中的试错方法的进行比现实生活快很多倍”。^② 因此这个元系统跃迁的意义不但不可以与动物社会的元系统跃迁相比拟,也不可以与用细胞生物出现的元系统跃迁相比拟,“它只能与生命的实际突现相比拟”。^③ 这个元系统跃迁的公式是:

文化 = 对思想的控制

在这里,社会文化包括物质文化与精神文化,物质文化指的是物质生产力及与其相联系的产品,而精神文明指的是艺术、宗教、科学、哲学等社会意识及其产品。图 8.8 是上述所讨论的生命进化的元系统跃迁的阶梯图。

▷▷ 8.2.2 倒数第二层分叉增长规律

但是,从动力学的观点看,元系统跃迁是在什么时候实现的呢?又在什么时候由于什么原因跃迁的范围和测度得到推广,从而在进化中占据一个支配地位呢?当然突现出一个控制机制 C' 是在最顶上的那一层,它控制着 $S_1, S_2, \dots, S_n$, 后者是倒数第二层。当 S_i 还不是很大、数目还不是很多时, C' 就已经形成了。 C' 的形成,由于它的控制的作用,改变了 S_i 的行为方式,并使它们丧失某些不适应 C' 的行为方式。当 S_i 的行为以及行为的改变对于

① V. F. Turchin, *The phenomenon of Science*. Columbia University Press, 1977, chapter 4, p. 15. <http://pespmc1.vub.ac.be/POS/default.html>.

② V. F. Turchin, "A Dialogue on Metasystem Transition" The Citycollege of New York, 1999, p. 42.

③ V. F. Turchin, *The Phenomenon of Science*. Columbia University Press, 1977, chapter 4, p. 15.

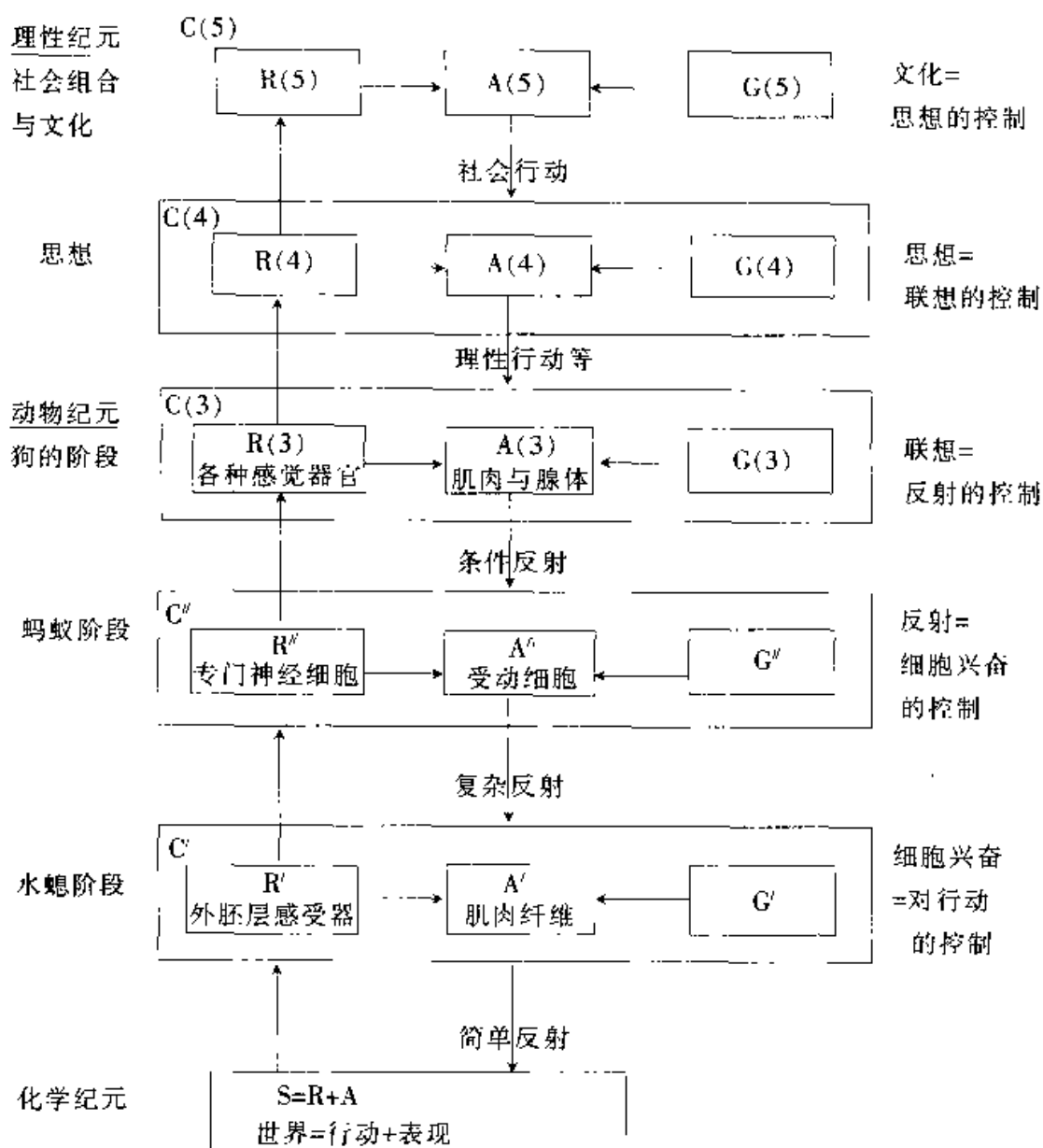


图 8.8 生命进化的阶梯

元系统和有机体特别有用时, S_i 便迅速增长, 它繁殖增快, 并有大量的 S_i 被组织到 S'_i 中, 在范围上和测度上都逐渐地占了支配地位, 对这种情况, 图琴称之为倒数第二层分叉增长规律。这里几点需要说明:

1. 并非所有的 C' 控制的 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 都迅速增长, 只有那些最能适应有机体或复杂系统生存的 C' 才能使倒数第二层迅速增长。这里有一个关于 C' 的多样性以及自然界对这种多样性进行选择与保存的问题, 所以叫做分叉增长。例如多细胞组织的专化就是这种 C' 的多样性的表现。

2. $S_1, S_2, \dots, S_n$ 在被控制过程中行为方式的改变和繁殖, 也对 C' 的发展起到加速的作用, S_i 之所以能加速增长, 是因为它对 C' 、从而对 S' 有用。

3. 在元系统跃迁的过程中有一个控制者 C' 与被控制者 S_i 相互加强的正反馈过程起作用, S_i 愈繁殖, 它的多样性愈大, 它的适应性行为愈发展, 它就愈能加强和精确化控制机制 C' , 反之 C' 愈适应环境, 愈有利于复杂系统的发展, 就愈能加速倒数第二层系统的发展与繁殖。这是一个正反馈的相互促进导致元系统跃迁的发展问题。这里新层次的突现有一个动态机制, 比起西蒙和罗森关于层次突现的静态模型来说是前进了一步, 西蒙和罗森在进行层次突现的分析时, 他们讨论的子单元是静态的、固定不变的。

关于这个问题图琴说了两段重要的话:

“当子系统 S_i 的数目仍是很少的时候, 控制系统的初步就已形成了, 我们在上面已经知道, 这是试错法(按: 这里指的是盲目的多样性和选择的保存规律)唯一能够起作用的方式。但控制子系统 C' 已经形成, 有大量子系统 S_i 繁殖, 而在这个过程中, 无论 S_i 还是 C' 都精确化了。子系统 S_i 的控制结构的出现并不能得出结论说子系统 S_i 迅速增长, 宁可说它超前于并导致这个增长是因为它使 S_i 的繁殖对有机体有用, 组织特定层次的载体分支选出只在新的较高层次形成。这个特征被称之为倒数第二层分叉增长规律。”^①

“原初, 因为我们上文论述过的组合因素, 所以诸种复制的子系统的整合只能在小范围里产生。但是, 当所需的组合已被发现、新的控制者已经突现的时候, 就典型地可以控制越来越多的被整合的子系统, 这也是几何的因素与组合的因素带给稳定性的优越性。一个大规模的整合便开始了。突现的行动者位于突现系统的最后一层; 被整合的子系统构建了倒数第二层。元系统跃迁使这些倒数第二层的子系统得以递增繁殖。当大自然发现蛋白质是用四个核苷酸按顺序排列进行编码的原理时, 核苷酸的数量便开始增长, 出现了由数以千计的核苷酸组成的大分子。当可以联合其他细胞的细胞突现后, 整合了的细胞数量不断增加, 便开始形成多细胞有机体, 直到它们达到现今的动物的大小。人类社会也一样。一个有很好的组织的社会开

① V. Turchin, *The Phenomenon of Science*, New York, Columbia University Press 1977, chapter 3, p. 3.

始以指数的速率发展。所有这些都是一般控制论规律的例证。”^①

F. 海里津说:“将进化过程当做层次序列的阶梯进行描述,图琴明确引进了元系统跃迁这个进化基本过程或进化的‘量子’的概念,从这点出发,图琴最重要的贡献也许是他的‘倒数第二层分叉增长定律’。这个定律可以看做是对元系统跃迁的较详细的动力学研究。它说明,在控制着子系统 S_i 的数目的、经变异与选择而形成的控制系统 C' 出现之后, S_i 会倾向于繁殖与分化(而不像西蒙关于超系统形成时的子系统那样,是固定不变的),其理由是当控制 S_i 的多样性愈大,发展和加强控制机制 C 就愈重要。因而 C 的发展和 S_i 的繁殖是一个相互加强的过程。结果元系统跃迁由一个正反馈来刻画,在那里一个小小的进化被强烈地加速,而在新的平衡态达到时,这个发展才减慢下来。”^②

►► 8.3 感知控制的概念

如果说,图琴的元系统跃迁理论着重研究复杂系统中的有中央控制的多层级控制系统是怎样形成的,是怎样在演化中发展起来的,W. 鲍威斯的感知控制论则着重对已经形成的多层次控制系统的基本控制原理以及多层次控制系统、特别是人类认知系统的控制结构和功能进行精细的分析。他们二人大体上在同一时间里创造了杰出的生命控制论,但他们彼此并不认识,也没有进行相互沟通。图琴当时在苏联原子能物理研究所工作,而鲍威斯则在芝加哥大学工作,他们所做的工作侧重点并不相同,但彼此的工作却紧密配合,仿佛事先有了默契似的。所以 8.3 与 8.4 将要讨论的是两个重要的原理:(1)生命控制的基本机制,它加深和发展了我们在第3章讨论过的维纳控制论模型。(2)人类认知的层级控制。元系统跃迁论述了生命和人类及其他复杂系统的层次进化,这个进化在人类大脑的结构功能中达到

① V. Turchin, “A Dialogue on Metasystem Transition.” Chapter 3 in F. Heylighen, c. Joslyn & V Turchin(eds): *The Quantum of Evolution*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1995, pp. 5-59.

② F. Heylighen et. al (eds.) *The Quantum of Evolution*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, p. 61.

了顶点,产生了人类认知的 11 个层级。威廉·鲍威斯详细分析了这 11 个层级。本节将讨论生命控制的基本机制,下一节讨论人类认知的 11 个层级。

从生命控制的观点看,控制机制是生命的本质,^①是一切行为的中心的和决定的因素或生命的“基本原则”(fundamental principle)。^②



鲍威斯(W. T. Powers 1928—)

那么什么是控制呢?鲍威斯指出:“A 称做控制 B,仅当对于所有作用于 B 的干扰影响,A 总要产生一种行动,它倾向于强烈地抵消这种干扰影响 B 的效应”,^③所以它面临招致变化的各种因素中保持动态的稳定。这个概念与传统控制论的控制概念基本相同,但如果从能量的观点看,一个系统能够这样做(而成为控制系统)时,它必须是一个耗散结构;而任何复杂系统都必须通

过控制机制才能达到适应性自稳定和适应性自组织以保持自己的有序结构。

鲍威斯控制论以及它的这个定义从功能和机制上概括了范围广大的系统科学领域,包括耗散结构理论、协同学、混沌理论、复杂适应系统理论,所以必须从复杂系统及其进化的新观念来研究控制论,又要从控制机制的视角来研究复杂系统。

按照鲍威斯的理论,控制系统的运作可以概括于下图中:

这是一个负反馈回路图,其中有五个 k 函数,用方框表示,包括输入函数 K_i 、输出函数 K_o 、环境函数(反馈函数) K_e 、干扰函数 K_d 以及比较函数 K_c 。有六个变量: r , p , e , a , q , d , 在带箭头的线中传递。上图中虚线之上

① W. T. Powers, *Behavior: The Control of Perception*, New York, Aldine de Gruyter, 1987, p. 47.

② Ibid., p. 44.

③ W. T. Powers, "A Brief Introduction to Perceptual Control Theory", http://home.earthlink.net/~powers_w/whatpct.html, p. 1, 2003.

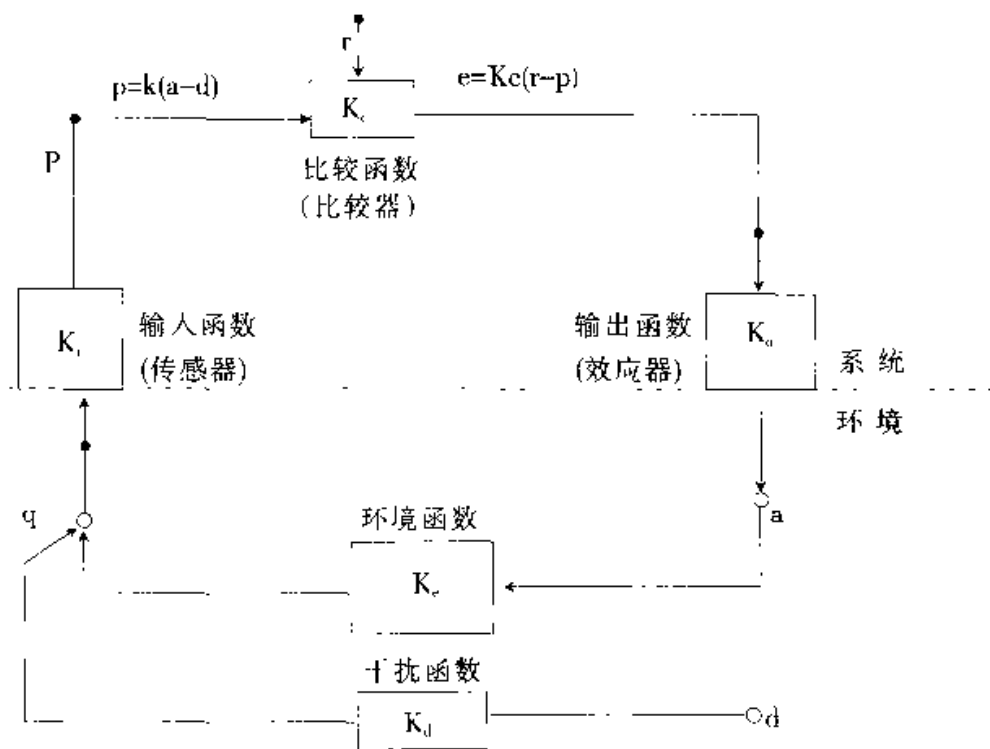


图 8.9 控制系统与环境

为控制系统,虚线之下为环境,黑点表示来自另一层级或传向另一个层级的结点。

在这些变量中,有两个最为重要的关系式:

$$(1) a = K_a(e) = K_a K_c(r - p),$$

$$e = K_c(r - p)$$

$$(2) P = K_i(q) = K_i(K_s a - K_d d)$$

(1)式表明,系统输出的行动 a 是基准信号,即目的信号与感知信号之间的偏差的函数;这个偏离越大,为纠正它所需要的行动变量就越大。(2)式表明,感知信号是干扰变量与行动变量加权差的函数,它报告了行动抵消干扰以达到基准信号所指示的稳定性的情况。现在的问题是,在这个系统及其环境中,到底谁控制了谁呢?是感知控制了行动(或刺激控制了反应)呢?还是行动控制了感知?按照鲍威斯的定义,所谓控制就是尽可能抵消某个变量所受的干扰,使其保持某种基准的动态稳定性。从这个观点看,不是感知信号控制行动,而是系统的行动控制感知信号,使感知信号尽可能与目的信号相符。这就是感知控制论不同于传统控制论的一个基本原理。

现在,我们沿着这个反馈回路来解释一下这些变量或函数的意义:

1. 我们来看被控变量 q 。一切生命系统以及一切复杂控制系统都是要对某种环境变量 q 进行控制。这里被控变量 q 可以是生命体外的环境,也可以是生命体内的因素,例如体液、体温、血压等等。人们可以想像当外界温度环境已导致悬崖万丈冰、而你的体温不能控制到 36°C 时会出现什么情况,大概就会明白控制 q 对于生命是何等重要。那么所谓控制是什么意思?就是当 q 受到干扰时,生命系统总能产生一种行动变量 a ,即 action,来抵消这种外界的干扰或体内的扰动 d 。从传统控制论的观点看,变量 q 被看做是控制系统的一种输出,而从新控制论的观点看,控制图没有表示这个“输出”,而是将它看做输入的源泉,这个控制图有两个输入端 r 与 d ,而没有输出端。

那么 a 怎么可能在任何时间均随 q 的变化而产生一种相适应的对抗的行动 a 呢?

2. 这就必须有一个或多个感受器或输入函数 k_i 来接受、获得和处理被控制变量及其被干扰的信息,得到感知信号或感知信息 P ,作为行动的根据之一。传感器是什么?是对外部或内部环境信息的接受与处理装置,它可以是空调机中一个测量机内温度的装置,例如一个热敏电阻之类,它与空调机内一个电路开关相连接。也可以是人们“五官”感觉的神经末梢,下一节我们将会看到人类的认知活动有 11 种“传感器”。

不要认为我们的行动 a 总可以控制 q 。根据申农信息论第十定律和艾什比的“必要多样性定律”,只有用 a 的多样性才能抵消 d 的多样性,^①可事实上环境及其干扰的多样性或复杂性总是大于 a 的行为方式的多样性。这就会导致控制的困难或控制的失败。又根据阿维德·阿廉“必要层次定律”,即调节与控制能力的不足和不确定,就可以和更需要通过层次组织来加以补偿。^② 这样生物进化到人类就发展出 11 个层次的输入函数(传感器),包括强度感知、感觉、构型、转换、事件直至范畴、程序、原理、系统观念等 11 个感知和认知的层次,来补偿但并非完全克服控制的困难。这 11 个

① W. Ross Ashby, *An Introduction to Cybernetic*. London Chapman & Hall LTD, 1957, pp. 206-207.

② Arvid Aulin, *Cybernetic Laws of Social Progress*. Pergamon. Press (Oxford and New York.), 1984, p. 115.

层次的感知或认知,都属于 K_i 和 P_i 的范畴。

3. 我们再就每一个层次来分析比较函数(或比较器、决策器、控制器)。感受器的刺激或各层次的感知并不决定我们的行动。关键地决定我们行动的东西是我们某一个感知控制层次的那个“目的”,即基准信号,基准信息 r 。在比较器中,将基准信号 r 与环境和被控结果的感知 P 相比较,得出偏差信号 $e = r - p$,作为行动 a 的指导。如果感知与基准条件完全一致,即 $p = r$,或 $e = r - p = 0$,即 $a = K_0(e) = 0$,控制系统就根本不需要行动,但由于环境干扰以及有机体的内部扰动, $r - p$ 不可能等于 0。这就会产生一种永恒的偏差、永恒的矛盾,即目标状态(理想状态)与实际状态的矛盾,从而导致系统的行动。生命本身,或广义地说,一切复杂系统的生命过程,就是解决问题、消除偏差的过程,并以某种不能解决的问题或不能消除的偏差而告终:这就是那个生命过程的死亡。

4. 输出函数 K_0 与输出变量 a :输出函数发生于传统控制论所说的效应器或执行器上,如动物的肌肉、自动机的马达等,它将指令信号或偏差信号转变为物理效应,成为一种行动,即输出变量 a 。它不是目的,而是达到目的的手段。

5. 基准信号(reference signal)。基准信号这个名词,可翻译成参照信号,参考信号。这个概念在传统控制论中以“给定点”(set point)或“给定值”(set value)、“目标值”(object value)的形式给出。如空调机中设定的我们所期望的温度,导弹中设定的导弹与目标之间的零点距离,不过工程控制论常将它看做是从系统的外部输入进来的,而如果机器的控制者是人本身,就往往容易产生一些混淆,以为那目标存在于环境中,是从环境中输入的,如导弹要命中的目标位置,室内温度的基准,而事实上在这种情况下,基准信号也只存在于人的大脑中,只是传统的工程控制忽视了和排斥了这个大脑运作的分析。鲍威斯最重要的贡献之一就是十分重视这个大脑运作的控制论分析,并为此提出了作为“目标信息”的基准信号的概念,并在模型图中明确加以标示,明确指明它不是从系统外部进入的,而是系统本身固有的本质因素。在生物系统中,它通常来自上一个层次,来自基因。鲍威斯交互地使用基准条件、基准信号、基准值、基准变量这些名词来说明系统这样一种状态,以它作为标准来决定被控的变量对它的偏差有多大,以决定抵消这个偏差的行动。

因此生命控制论或感知控制论的基本特点是:(1)将控制论与复杂系统的研究特别是生命系统的研究结合起来,认为控制机制是生命的本质,也是复杂系统的本质。(2)特别强调目的性在控制系统中的作用,创立“基准信号”或“基准条件”的概念与参数来表达目的性及其在控制过程中的地位。(3)提出了生命控制和复杂系统控制的一个基本原理:不是系统的感知控制系统的行动,而是系统的行动控制系统的感知。

►► 8.4 人类认知的 11 个层次

鲍威斯一直是在普遍的意义上使用“感知”一词,所有的经验(从原始的感觉输入起到最抽象的思维表现止,从阿米巴的感受性到人类的系统思维止)都可以用感知一词来表示。事实上它就是我们通常使用的认知一词。它有下列 11 个具体层次,即强度、感觉、构型、转换、事件、关系、范畴、序列、程序、原则和系统概念等层次。层次之间的相互关系是:(1)每一个层次都组成一个或多个如图 8.9 所示的控制系统,其基准条件或基准信息由上一层次的控制系统的输出来加以确定。(2)上级层次运用下级层次系统、运用低阶层次系统作为控制手段,以达到上级层次所要达到的目的,实现按它所要求的那样来改变环境,并将其感知或认知信号提供给它作为输入函数。其基本关系如图 8.10 所示。(3)低层次控制系统可以没有高层次控制系统而独立存在,但高层次系统却不能离开低层次系统而独立存在。这就可以看到,高层次系统是通过低层次系统经层级突现而发展起来的。这就是组成 11 个层次的认知控制过程。值得指出的是,这 11 个层次的划分不是任意的,它的划分和一般认知心理学的层次分类之所以不同,是因为它是从控制论的观点来考虑问题。只要我们考虑每一个低层次的认知是怎样被控制的,是通过什么机制被控制的,便可能发现有一个比它高一层次的控制系统在运作。(参见图 8.10)

1. 强度(intensities)感知

首先需要对一阶控制系统做一个界定。在输入的方面,外部世界要施加一个信息流于神经系统之中,就必须通过刺激感觉神经末梢来起作用,因此,感觉末梢将某种物理相互作用的量转换为神经流。大脑所接受和处理

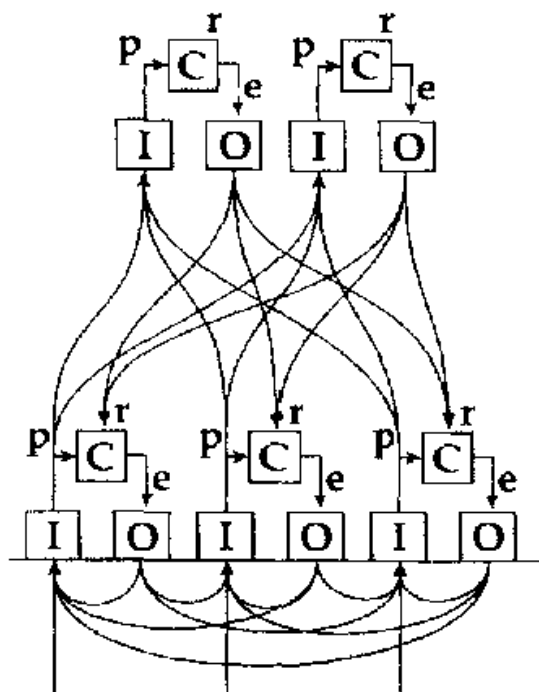


图 8.10 二层的控制关系

的所有感觉信息都以原初的神经流的形式存在于一阶感知信号中。在输出方面,中枢系统通过调整一阶控制系统的基准信号改变人体的肌肉状态或体液状态,以这种方式来影响外部世界以及我们的强度感知。一阶感知信号是由感觉神经末端产生的,作为神经信号,它的变化是量的和一维的,即它只表现现时有多少刺激,而不是有哪一些种类的刺激,因而一阶感知信号表现感觉末梢的刺激强度,第一层的感知仅仅是无数表现着纯粹数量的信号和集合。这是一个神经解剖学的事实,我们有温暖的感觉,事实上它是我们皮肤的无数部位的接收器接收不同的强度信号流的结果。鲍威斯将感觉分解为强度感知的集合是有道理的。从一阶感知信号的定义和性质来看,一阶感知在经验上并不必然对应一个物理状态。例如,电流、触摸和化学中毒都会使人产生同样触觉,但从一阶感知的角度来看,对于这些不同原因并不能加以区别,也不能区分出触觉是从左边来的还是右边来的,它仅仅反映了感觉末梢发生了什么以及接受了多少用物理单位度量的刺激。所以,从这个角度来看,一阶感知在经验上并不和一定的外部实体相匹配,外部实体的实在性仅仅是我们的建构,因而,我们将一阶感知信号看做强度信号。

2. 感觉(sensation)

这一层感知是在第一层感知的基础上产生出来的,它是强度感知的函数,是受许多一阶神经流共同影响的结果。它与某种平均的强度相联系,每个强度成为它的一维向量。所以,二阶输入函数和一阶输入函数之间的关系是多对一的对应。从矢量关系的角度来看,一阶强度信号如果作为基本矢量,那么他们的加权总和就形成一个新的向量。例如,味觉是四种强度信号变量的函数,颜色是三种信号变量的函数。因此,这个层次上的信号可称做“感觉”。

这个层次的信号是否对应于外部世界的独立的实体呢?鲍威斯说:“这种信号是否对应于外部世界的任何单一的实体,这是次要的问题,它可以有对应,也可以没有对应的东西”^①。无可否认,感觉信号依赖于物理事件:新鲜柠檬的味道包含了一个容易认辨的向量,它由糖与酸产生的强度信号导出,但显然并无物理实体与它相对应。柠檬实体中,糖的浓度与酸的浓度并不混和在一起,也不化合在一起。这就支持了建构主义的认识论和实在论。

3. 构型(configuration)

走进房间,从不同的角度观察一张桌子,它呈现给我们不同的图像,这些图像区别极大,侧面看,正面看,近看,远看,我们的图像感觉发生极大变化。但我们显然能判断出它是同一张桌子。这说明在不同的感觉之间存在着同构性,它就是我们通常所说的“对象”、“客体”、“物体”,它就是感觉变化中的同构形式。假如人们能生活在太阳上,那里的变化是如此捉摸不定,找不到什么同构形式或变化中的持续性,人们也许根本不会有物体或客体的概念。因此,构型感知是一组感觉向量的不变函数,即进入高阶层的二阶感知信号在感知计算中心中进行信息处理以及提炼之后得到的某些稳定的构型关系。从这个角度来看,当我们环视周围时,不但会有关于周围环境的一些感觉,而且我们更能注意到在许多感觉变化之中所隐含的不变形式。因而,视觉构型、触觉构型、听觉构型都可为我们提供所谓客体的概念。当然,一个只有三阶控制系统的生物体只能由遗传提供的内在程序来选择构型状态,要想使系统自身能控制这些构型,想使系统具有更高的认知形式,

① Powers, W. T. *Behavior: The Control of Perception*. New York: Aldine de Gruyter, 1987, p. 102.

生物体需要更高的组织层次和控制层次。

4. 转换(transitions)

这里所说的转换,是对实体构型及其相关的感觉与强度从一种状态变换为另一种状况的感知。这就是我们通常所说的各种方式的运动与变化。对于我们的大脑来说,一个构型的运动与变化,只要它在运动中前后足够地相似,而且运动不是太慢(如钟表中的时针与分针)也不是太快(如果秒针1/10秒旋转一周),则人们是可以感知它的。不但观察到外界运动是一种转换感知,在浴缸里对水温上升的感知、以及对自己的身体运动的感知都是一种对转换的感知。转换的感知对于较为高级的动物来说是绝对必要的,这些有机体不仅要静态的环境作出感知与反应,而且要对动态的环境和自身的构型变化作出感知、反应与控制。篮球运动员、舞蹈演员身体构型的灵活变化,就是转换的感知和控制的活生生的事例。

实验神经心理学证明,转换的感知和控制是在丘脑与大脑皮层内层之间的部位里实现的,这个认知层次的感受器和控制器就存在于这里,对某些临床病人大脑的这个部位通以某种电流的刺激,就会引起他们有医生迅速走来的视觉形象,尽管事实上根本没有这回事。当带电测试针插入猫头的这个部位,缓慢改变电脉冲的频率,猫头就会平稳地从这一边转向另一边。

5. 事件(events)

一个事件是一些转换、构型、感觉或强度感知组成的系列,这个系列有它的开端、中间过程和终结。它是作为一个经历一定时间的统一整体被感知和控制的,所以被称为对一个事件的感知,如一个球落下后的弹跳、一个炸弹的爆炸、两座世贸大楼的倒塌、打开一扇门、演唱一段歌曲、吃一顿晚餐等等。总之一一个事件的感知,是由一个转换序列组成的,它是作为一个不可分离的整体被认出的。要控制和改变这个事件,就得改变这个转换的序列或组合,事件便是这个序列的基本单元。

脑刺激实验同样证明在认知中存在着这个层级的控制、事件和序列的感知和控制在大脑皮层内层进行。比克福特(Bickford)等人在一位女性的前椎体皮层正下方做了一个实验,给她的该部位通以每秒1个脉冲到8个脉冲的电流,她就会不由自主地进行和重复某一个动作序列。如用一只脚擦着另一只脚,或者用手指拨动着她在手中掌握住的东西,使其旋转。这就

是对事件的感知与控制。^①

6. 关系 (relationship)

我们从事件的感知层次和控制层次向上走去,进入一个新的层次,在这里我们越出了直观的“外部物理世界”范围,主要地进入与我们的“主观概念相关”的领域。这就是关系层次。

在这方面,我们首先接触的是一种空间的关系,如前后、左右、上下、远近、里外的关系,在时间上有先后、开端、中间与结束,在数量上有大于、小于、高于、矮于,在性质上有关于、恶于、丑于等等。所有这些都是我们先前所说到的事件感知之间、构型感知之间以及其他低层次感知之间的一种关系。当几个人并肩走着,我们说他们之间有一个靠近的关系。我们能看到、摸到或嗅到这个“在”、“靠近”吗?当我说,我比你漂亮得多,这个“美于”的关系能直观到吗?我们已经进入一个一个观念的范畴。这里我们应该特别注意事件之间的因果关系。我们首先有第一个事件的感知,然后有第二个事件的感知,多次重复出现,我们便得到前因引起后果的概念。我们要把握住的的就是关系的认知和控制的层次,主要说的是它存在于我们头脑的观念之中,而不是在物理世界之中,这又是鲍威斯的一个建构主义认知观点。从这一层开始,鲍威斯仍然称之为“感知”层次,我们认为,从本层开始的以后各层已经越出了狭义的“感知”层次,准确地说我们进入的是新的认知层次。这虽然好像只是一个用词的问题,但事实上,这个用词影响了学术界从认知的观点来看感知控制论。

7. 范畴 (category)

范畴表示了某些事物或事件的类、类型、种类、集合、范围、命名等等。按照鲍威斯的定义,“范畴是任何一种低阶感知集合出现时所产生的感知”^②。它用一种命名或其他类指示来概括该事物集合元素之间的共同特征或典型特征。它在实践上的优点就是帮助我们找出有某种特征的事物。“给我拿一把剪刀来”这个范畴或类型的用法就可以帮助我们寻找到你合适的东西。如果拿给你的剪刀不合适,你便会补充一些特征,明确或修改你

① Powers, W. T. *Behavior: The Control of Perception*. New York: Aldine de Gruyter, 1987, p. 102.

② W. T. Powers, *Making Sense of Behavior*. Benchmark Palliation Inc., 1998, p. 145.

的集合的范围,明确或修改你的“类”。这样在心智中、或在认知中便有了一个感知和控制特别的低阶感知和低阶行动的系统。范畴还有一个作用:其在集合中的包含、相交、相并、等价等关系,组成了推理的逻辑。在比范畴这个层次较低的层次,所有的感知或认知是连续可变的,但到了范畴的层次,就有界限分明的性质,即“或者是,或者不是”的性质。在构型的层次中,我们可以将猫的构型与狗的构型结合起来,我们还可以形成狮身人面的构型,但在范畴层次中,我们是毫不含糊的,它是“狗”、是“猫”、是“狮子”而不是“人”,是不能混淆的。因为我们讲的是范畴,不是单个具体的事物或构型,而当用范畴要指称的是具体事物时,我们要非常困难地补充许多特征。事实上,一个具体的形象是不能用语言、符号做充分表达的。我请你用语言将我们的面孔的样子说出来,你总是说不全的。这是范畴的一个特点,也是它的一个弱点。

8. 序列(sequence)

序列是某种低层感知或认知(如构型、事件、范畴等)的时间序。这个序列控制层次和感知层次的作用就是使我们有能力控制序列。一种疾病治疗是先开刀后麻醉,还是先麻醉后开刀,先打针后消毒,还是先消毒后打针,其区别是非常大的。人类的感知与行动是有时序的。读一个句子,编织一件毛衣,打一个电话,动作、范畴、符号次序都不能颠倒。人类的头脑有一个基准信号编排这个序列,有一个效应器执行这个序列,有一个感受器认知这个序列,有一个比较器来纠正或补偿错误的序列,才使我们能够生活在井井有条的世界里。

9. 程序(program)

程序是通过试验和选择点(choice - points)——又称为决策点(decision points)而联结起来的序列组成的结构。程序与序列之间的区别,就在于前者有选择点。它可能是树(tree)形式,但大多数情况是个网络(network)的形式,即以后的进程可以返回较早的起点。当一个序列进到一个选择点或决策点时,程序要求有一个选择。当你大学毕业时,如果要考研究生,你必须“干这个”,如复习功课、准备英文等等;如果你选择就业,你必须“干那个”,如求职申请等等。当一个序列经过某一试验点时,如果检查出你有乙型肝炎,你必须执行特定的医疗序列,如果检查出是膀胱炎,你必须执行另一个医疗序列。所以一个程序是一个不确定事件的

网络。

鲍威斯说,要控制一个程序认知,就是要改变低层次的感知或认知,以保持程序正确进行。“长除法是我们必须学习的一个很好的例子,在某个序列上,指令并不告诉我们要写下什么数字,而全看我们已经得出了什么数字。有一个规则告诉我们,如果一个数目大于能被除尽的数你要干什么,而小于能被除尽的数又要干什么,但你不知道怎样做,直至程序运转到那一步将数字显示了出来。我们都能接受到长除法程序结构,但它并不规定行动的具体序列。在程序层次那里我们要理性地思维,要思考出怎样做才能达到我们的目的。”^①所以程序同样是我们的认知中有感受器、有基本信息、有比较决策器、有执行效应器的一个独立认知层次。

10. 原理(principle)

一个行动的或理性的程序要被创造出来,要进行更换,要进行评价,去决定要一些什么程序,不要一些什么程序,就超出了程序本身这个层次而进入一个能指导与控制程序的新认知层次,这就是原理层次。在程序中,我们运用思维来思考我们的行动步骤,而在原理上我们思考我们所思考的东西。在数学上我们的程序是组织我们解决问题的计算步骤,安排我们的符号演算,而在原理层次上,我们思考我们的步骤与演算是否可能,是否适当。原理对于程序是一个元系统。

对于我们的行动目的来说,原理是一个最基本的战略与策略。一个旅行的程序有多种多样,而有个基本原理就是保证睡眠;一个工程有多种多样的施工程序,其中一个最重要的原则或原理就是安全第一。游击战有许多种打法,不同的游击战有不同的程序,但这些程序受一个原理支配,比如毛泽东所说的“敌进我退,敌驻我扰,敌疲我打,敌退我追”的原理以及“集中力量打歼灭战的原则”。

在科学中,牛顿定律、能量守恒、边际效用、生态保护等等,对于相关程序的制定、评价、更换、实施都是一些原理,一旦它们为行动者所掌握,就成为他的头脑中的原理层次。

在道德上,我们有一系列原则,如功利原则、仁爱原则、正义原则、环保原则,以及较为具体的如诚实原则、不伤害原则、合作原则等等,都对程序层

^① W. T. Powers, *Making Sense of Behavior*. 1998, Benchmark Palliation Inc., p. 148.

次起到高层的控制作用。

所有这些实践的、科学的和道德的原则,都是比较一般性和抽象性的,但它对低层次的认知与行动起着控制作用则是不容置疑的。

11. 系统概念(system concepts)

将各种原理组合起来,便形成认知的一个融会贯通的种类,这就是认知的最后一个层级,鲍威斯称之为系统观念。在这里,有一系列事实的、抽象的或道德的原则相互联系着,组成一个系统整体,因而称之为系统观念。

鲍威斯说:“系统概念是某些组织实体的至高无上的观念;在这个层次之下的原理层次因为这个系统观念而是其所是。物理科学是一组巨大的系统观念,它建立在精心制作的并协调一致的物理学的基础上。其他系统观念,例如‘自我’,也是由一组原则的集合而建立起来的,不过当然没有物理学原理工作得那样好。某些系统概念如宗教,是重要的和崇高的,而另一些系统概念则是完全平凡的和世俗的,如保龄球俱乐部之类的东西”。^①很显然,系统概念这个层次是属于概念体系、科学规范以及意识形态之类的总体概念。不过鲍威斯不是从社会文化的角度来看它,将社会文化看做是对个人思想的控制;鲍威斯将个人所接受的观念体系看做是个人心理体系中的一个最高的层次,它不是存在于社会的文化体系中,而是存在于个人的头脑中,成为决定个人人性的最高灵魂。很显然,一个基督教徒和一个伊斯兰教教徒以及一个恐怖分子之间的系统观念是不同的。我们应该承认这种主观的实在性。鲍威斯说:“最直接地支配我们的生活的系统观念,我相信它对于我们来说是完全实在的,并且是我们努力加以维持的东西。它导致人们之间的原则冲突和规则冲突而引起的种种麻烦。”^②

鲍威斯的认知层次理论的独特之处在于:(1)所有的认知层次在横向上都有相同类型的控制结构,即都由输入函数 I(感受器)、输出函数 O(效应器)以及联结二者的比较器 C(控制器或决策器)组成,都通过感知信息、基准信息和偏差信息相互联系着。在纵向上彼此的认知有函数关系,形成一个循序渐进的多阶的函数链。这些认知层次的划分在低层次上(前5层)有坚实的神经解剖学根据(见表8.1),而在高层次上(后6层)则有非常明晰的逻

① W. T. Powers, *Making Sense of Behavior*. Benchmark Publication Inc., 1998. p. 150.

② *ibid.*, p. 151.

辑根据。而从进化认识论的观点看,这 11 个层次都是在生物进化史、心理进化史和社会进化史上从低级到高级、从简单到复杂发展起来的。

表 8.1 低层次认知控制的结构与特征

认知层级	名称	生理结构			认知特征	病态特征	资料来源
		感受器	比较器	效应器			
1	强度感知	肌肉与腺的神经末梢	脑干与上部脊髓的各卷层:感觉核、听觉核、前庭核、脑干核等	脊髓运动神经细胞	不能区别感知强度的来源,种类与原因,它与外界物理刺激一一对应。	阵挛振荡 clonus oscillations	Powers (2004) P116 P117
2	感觉	脑干中的楔形核、脊椎核、横向网状核	小脑中央神经核	脑干中的中板运动神经核、红神经核	能感觉不同特性,与强度感知的关系为多一对应	帕金森病	P116 P117
3	构型	小脑、丘脑某处	中脑某处以及小脑皮层颗粒细胞和帕金耶细胞	小脑中央神经核	认知对象客体	目的性颤抖、刺激的丘脑区,产生猫身体构型。	P116 P117 P120
4	转换(变化感知)	丘脑与大脑皮层之间	大脑皮层内体感觉区		认知对象的运动与速度	刺激大脑皮层下方病人有对象运动幻觉。	P134
5	序列与事件		大脑某处及大脑皮层下分的 limbic 系统		认知行为或对象的序列	刺激前椎体皮层下方,受试者不断重复一个序列动作。	P138

▶▶ 8.5 应用

本节对复杂系统的多层级控制理论、特别是鲍威斯的控制模型做一些

扩展的研究,将它运用于社会经济系统中。

现在我们运用多层次控制理论来解释社会经济系统的运作,主要是运用市场经济多层次控制的实例,来说明社会经济系统的自动调节问题。这项研究是在我们知道图琴和鲍威斯理论工作以前就做了的工作。^① 由于它与图琴和鲍威斯的多层次进化控制论的观点相当一致,所以可以作为系统进化控制论的一个例证来加以分析。

用系统的观点来看社会主义市场经济体系,我们首先应该将资源配置和经济运作看做是一个多层次的调控系统。这个多层次调控系统和一般控制系统一样,都是由监察机构(相当于传感器)、决策机构(相当于比较器)和执行机构(相当于效应器)组成的,用以调节控制系统由无序走向有序,实现系统的既定目标。同时,如果我们将社会发展看做是政治、经济、文化三元子系统相互作用的结果,就不仅应该将社会主义经济体系看做由市场经济调控的,而且还应该把它看做同时还受到社会政治目标及其机构调控和文化目标或伦理目标及其机构的调控。对于整个社会主义经济体系,既然有经济的、政治的和文化的调控,而每一种调控都有监察的、决策的和执行的机构,以及自己的目标函数或基准信息。这样,我们在驾驭社会主义经济发展中,有 $3 \times 4 = 12$ 个相互联系的机制,必须系统地加以考察和处理。

表 8.2 经济系统调控的 12 个要素

调控的 社会 二元系统	三大 机构	监察机构	决策机构	执行机构	目标函数
市场调控		市场价格	企业自主决策	利益动力机构	企业利润
行政调控		政府调研机构 与监察机构	政府干预与 宏观调控	政府财政 经济机构	国家利益
文化调控		社会传媒 机构与群众监督	社会伦理 调节机构	社会风气与 群众机构	价值观念

① 张华夏:《多层次经济运行机制和多层次经济学》,《自然辩证法研究》1994 年第 7 期。

现在我们分别讨论这 12 个要素及其相互关系。

▷▷ 8.5.1 市场调控及其要素

在社会发展的现阶段,经济世界如何能够从无序走向有序,从混乱走向秩序井然的系统,使资源比较好地进行配置而不至于造成浪费,使经济信息及时发出、传达和处理,不至于各行其事、盲目行动、相互冲突,从而最佳地或比较有效地发展生产力和提高人们的福利?大家知道,历史从正面与反面证明,市场就是这样一种最基本的系统整体的调节机制,它的出现是一种社会系统的元系统跃迁。并且,从进化论的观点看,从自然经济、计划经济、市场经济等多种形式中,通过自然的历史选择,人类目前采用了市场经济。这种情况也是符合图琴所说的倒数第二层的分叉增长规律的。各个企业组织或其他社会经济组织处于最低的一层,包含无数企业的市场经济处于倒数第二层。那些能使它所包含的经济组织迅速增长的市场经济体系被选择了。市场经济体系的形成是一个自组织问题,要到下一章才进行研究,但处于市场环境中的企业组织,即在图 8.11 所标明的经济系统 S,则是一个典型的控制系统,它由作为传感器(监察机构)的市场价格、作为控制器(决策机构)的企业自主决策和作为执行器(执行机构)的经营者受利益驱动的运作三大要素所组成,体现了市场运作的三大机制。

1. 首先,我们讨论市场经济系统的第一个要素:市场价格。由于社会存在着复杂的分工,无数的微观个体、分散的企业经营者和经营单位如何能够适应社会上千差万别而又千变万化的物质需要和文化需要、生活需要和生产需要而进行生产,有序地组织起来成为一个系统整体呢?我们首先要有一个关于社会需要的信息机制,即信息传递、加工、整合的机制。这就是市场价格。市场价格就是一个最简捷最有效的信息传递、加工和整合协调机制。当供不应求时价格上涨,供过于求时价格下跌。就这样,市场将社会供求信息不需要多少能量耗费、不花多少交易成本就横向地从消费者迅速地直接传达到最需要它的个体经营者、企业或公司的生产决策人那里。依据这个信息,经营者作出生产什么和生产多少的决策,使纷纭众多的生产与消费活动达到供需之间的动态平衡(即所谓瓦尔拉斯均衡)。这个灵巧的机制是指令性的计划经济所不能达到的。在计划经济中,计划部门必须自下而上收集亿万居民的需求信息、百万企业的经营信息,经过处理,解无数

个供求联立优化方程组,将指令发至各企业,规定它们的产品的质量、数量和人力物力资源的补给。实践证明,计划部门愈来愈承担不了这个信息收集和处理的负担。苏联计划经济头25年间,其计划复杂程度增长了1600倍,而计划成本的增长速度与国民经济总产值增长率的平方成正比。如6.4例4中所指出的指令性计划经济所要求的信息处理,早已超过了布莱曼极限了。由于信息处理不过来,指令性计划经济总是以供需脱节、整体无序而告终。所以市场经济有而计划经济没有那种反应灵敏的信息机制。

2. 企业经济目标(第二要素)和企业决策(第三要素)。企业生产和经营需要决策。如图8.11所示,在市场经济中,企业的决策机构(董事会以及各级经理们)将市场价格这个输入信息与企业内部结构信息(首先是边际成本,它反映了企业技术条件、劳动生产率等等)和企业目标函数(首先是利润)综合地加以比较,有利可图时扩大生产,增加投资,无利可图时减少生产,压缩投资,最后达到企业利润最大化这个经济目标。利润最大化的目标和为此而进行的企业间的竞争,使企业具有“利益感”、“紧迫感”和“危机感”,成为激励企业不断改进生产、提高技术、改善经营以满足自己同时也满足社会不断增长的物质文化需要的原动力。

3. 企业决策的执行机构(第四个要素)。从市场经济运作来说,应把企业推向市场,按市场情况确定经营决策。而决策需要执行,执行需要激励机制。市场经济下的企业执行机构通过企业内部层层承包、联产计酬、工资、奖励均与效益挂钩——即在企业内部推行劳动交换(劳动与收益的交换)从而产生物质利益的激励机制作为动力,推动经营者和生产者执行决策、改进经营、提高技术、增加产品。马克思说:“人们奋斗所争取的一切,都同他们的利益有关。”^①首先是经济利益驱动着人们的经济行为。

正因为市场经济具有市场价格的信息机制或监察机构,企业具有相互竞争、自负盈亏、自主决策的决策机构,利益驱动的执行机构,所以它能促进社会资源的最优配置,促进生产力、科学与技术的高度发展。在它支配的社会里,其所创造的生产力比过去一切时代创造出来的生产力的总和还要大。经济学家亚当·斯密将市场比做“看不见的手”。他说,在市场经济中,“人人想方设法使自己的资源产生最高的价值。一般人不必去追求什么公共利

^① 《马克思恩格斯全集》第1卷,人民出版社1972年版,第82页。

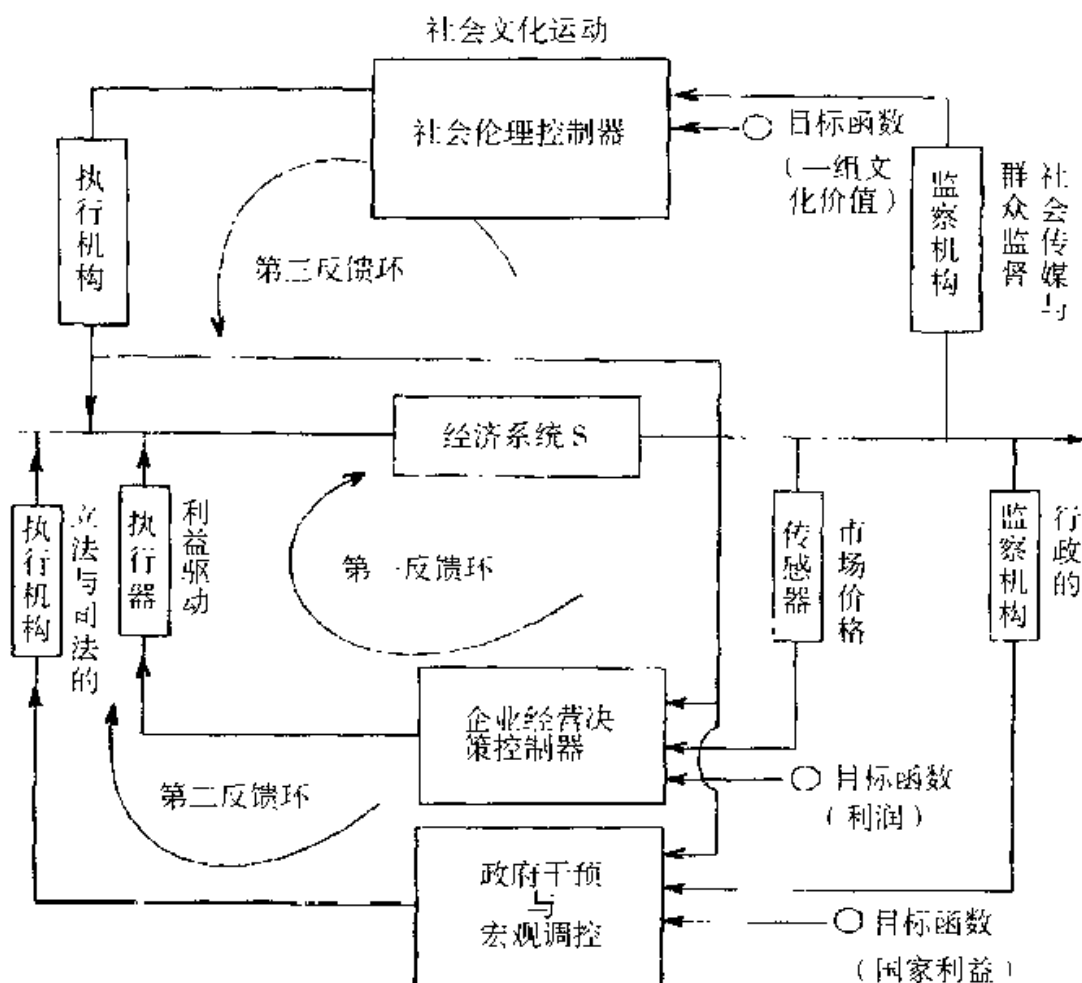


图 8.11 经济系统的政治、经济、文化调控图

益,也不必知道自己对公共利益有什么贡献,他只关心自己的安康和福利。这样他就被一只看不见的手引领着,去促进原本不是他想要促进的利益。在追求自己利益时,个人对社会利益的贡献往往要比他自觉追求社会效益时更为有效”。^① 他在这里说的就是市场经济的微观调控,说的就是市场机制下企业的监察机构、决策机构、执行机构以及由此形成的反馈协调机制的作用,导致经济世界的有序结构。

▷▷ 8.5.2 政治目标与行政调控

但是,经济利润目标和市场调控,以及实现这种调控的四个要素,只是经济系统调控的一个方面。虽然市场调控是经济系统调控的最基础的方

① 亚当·斯密:《国富论》,下卷,郭大力译,商务印书馆 1972 年版,第 27 页。

面,但不要以为抓住这个基础的方面,什么问题都会迎刃而解。这是因为市场调控及其四大要素有它的正面作用,也有它的负面作用;有它的作用有效的范围,也有它的作用失效的范围。古典经济学的研究方法,不是采取系统思想方法,而是采用孤立因素分析法,将市场调控孤立起来,将它抽象化和理想化,才得出结论认为它在所有条件下、所有范围里都在标准的意义上起着最有效的发展生产力、最优地配置资源和最大限度增进人们福利的作用。这里所谓抽象化,就是忽略了市场不能控制的企业和事业外部经济效益,以及市场信息的“时滞效应”等等;这里所谓理想化,就是假设市场经济处于完全竞争的市场状态,以及交易双方信息完全对称等等。事实上,市场调控无论从整体上或从各要素上来看都有它的负效和失效方面。从它的监察机构或信息机制来看,市场价格不能完全反映社会需要信息,它的调控是事后调节,它只能告诉我们过去和现在的社会需要信息,而且由于投机,由于 G. 索罗斯所说的“主观参与”和凯恩斯所说的“合成谬误”的效应,这个过去和现在需要的信息也是“测不准的”。因此按这个信息进行生产能否符合将来的社会需要,就有很大的盲目性,所以市场总会导致周期性的经济波动以及危机与失业,因而不能导致资源的最优配置。马克思和恩格斯早就很尖锐地看到了这一点。再从利润目标和企业经济决策的机构来看,它在利润目标、边际成本、价格信息之间进行权衡作出决策,可是有利于企业的并不总是有利于社会的,因为企业外部经济负效益(它所造成的环境污染以及它的产品可能给消费者造成的害处)并不总是计入成本。如果鸦片由自由市场调控,它也会源源不绝地得到供应的。而企业或事业的外部正效益并不总是计入利润,例如普及教育的社会效益很大,但如果从教育机关创收的利润目标来看,实在是不可行的。至于科学研究,如果基础理论研究也由市场利润来调控,那将不再有爱因斯坦和居里夫人,他们或许也“下海”了。至于市场调控的执行机制,它的驱动力是利益激励。当然,没有利益激励,执行决策就没有动力。但单有利益激励,没有政治目标和文化调节,人们也不会有强烈的事业心,不会有崇高的价值导向,也不会有为崇高目标而奋斗的精神力量。这样也就不会最有效地克服困难,提高效率,发展生产,繁荣经济。因此市场调控无论从各个因素和它的整体运作来说,都有它的“失效”、“负效”和“不足”之处,它本身不能解决例如环境污染、贫富不均、公共事业的兴建、科学技术的研究与开发、教育医疗福利事业的兴办以及危机、

失业和垄断等问题。为了解决这些问题,在市场机制部分失效和全部失效的地方需要政府的干预和宏观的调节,补市场之不足,以便使我们的经济系统 S 达到比较理想的输出值,即更加有效地发展生产力、增进人的福利、更优地配置资源、更公平地进行分配、更合理地保护环境和更有效地发展文化教育事业,提高人的素质。政府对市场的干预与调控包括下列几种情况:(1)间接干预。例如政府能够制订环境保护法,并采取措施,补偿、减轻或克服环境污染。(2)直接经营和管理某些市场所不能调控的公共事业、基础设施、新兴产业和文化教育事业。(3)政府能够通过税收和设置社会福利事业与社会保险事业,进行国民财富再分配,缩小贫富差距,实现社会公正。(4)按照国家的整体利益和长远利益调控国民经济,减少或避免经济危机与经济波动,使国民经济稳定持续发展。

政府之所以能够进行这类对经济系统的宏观调控,是因为它也是由四个要素组成的反馈环:

1. 宏观监察机构(经济系统调控的第五个要素)。这是行政调控的传感器,它由中央以及各级统计局、中央银行以及各级银行的监察机构、政府各级调研机构组成,它的目的是调查了解经济发展的宏观变量,如一个国家的生产总值、价格水平、通胀水平、失业率、货币与银行利润等等,作为它要控制的变量,研究它们的变化规律及其相互关系规律。

2. 宏观调控的目标(第六个要素)和政府决策(第七个要素)机构。宏观调控即对经济系统的行政调控的目标是维护国家和全社会的利益,满足市场不能满足的公共需要。从企业的角度和从国家的角度考虑经济问题是不相同的,国家必须考虑长远的经济发展目标(如新兴产业的投资暂时亏本还要干)、经济稳定的目标、生态环境目标、资源利用的目标、教育与人口素质的目标、科学技术发展的目标以及社会公正和社会福利目标等等。为了实现这个体现国家和社会总体利益的目标,它将从第五要素获得的信息输入到政府决策机构中去。这决策机构包括立法机关(如人民代表大会)和行政决策机关(如国务院)根据宏观经济状况,作出方针、政策、法令和国民经济发展计划的决策等等。

3. 宏观调控的执行机构(第八个要素)。这就是政府的行政执行机构与司法机构,主要是财政机构。它使用法律、金融、财政、税收等手段贯彻政府决策。政府对经济的调控作用是不可忽视的。根据世界银行的统计,无

论穷国还是富国,各国政府开支占国内生产总值的比重近几十年来不断增长。1972—1986年间,在低收入不发达国家中,这个比值由19%增至23%,工业发达国家的这个比值由28%增至40%,而1985年,法、德、英三国公共开支占国民生产总值50%,瑞典高达65%,美国达37%,连日本也增加到33%。^①可见,当着我们强调转换经营机制时,切不可推卸责任,将最需要看得见的手来加以调节的事业推给市场。例如科学与教育的经费,需要政府的开支,连美国的科学方面的费用,都有2/3直接间接是由政府负担的。^②

以上四个要素要运行良好,需要下列四个条件:(1)政治目标必须公正,确实是为社会整体利益而不是为某一集团的利益。(2)在监察与获得和处理信息上,政府必须明察。(3)在决策机制上政府必须英明果断。(4)在执行机构上,政府必须廉洁与高效。

▷▷ 8.5.3 伦理调控及其要素

可是,在现实世界中,上述三个条件只是我们的理想目标,它是不能完全达到的。这也就是说,行政的宏观调控有它的正面的或有效的作用,也有它的负面的或失效的作用。政府调控机制不同于市场机制,它不是自发的、分散的和自然形成的,而是自觉的、集中统一的和人为形成的。在获得信息上就不像市场价格信息那么简单,要求政府必须详细进行调查研究,并准确预测未来趋势,才能有效地进行经济活动的宏观调控。例如,当经济过热尚未来临而即将来临时,政府就要未雨绸缪,减少政府开支,收缩货币发行。至于教育经费投资的社会效益如何,也往往为一些短视的政府官员所低估,并且人类对自己的未来的预测在能力上总是很有限的。所以政府在信息方面往往不能明察。至于目标与决策,政府常常受各种不同利益集团所左右,它们各有不同的价值观,在财政预算决策与分配上进行拔河比赛,使得决策往往不能公允,不能正确代表社会公正和社会利益的目标。况且政府干预与调控的目标函数是国家利益,往往不能从全球角度考虑问题,例如它往往

① 参见陆丁:《看得见的手》,上海人民出版社1993年版,第118页,以及丹·贝尔:《资本主义文化矛盾》,赵一凡、蒲隆、任晓晋译,三联书店1989年版,第70页。

② 丹·贝尔:《资本主义文化矛盾》,赵一凡、蒲隆、任晓晋译,三联书店1989年版,第282页。

不能从全球角度来处理资源的开发和环境的保护等问题。至于执行机制,官僚主义、腐败和低效率又总是不断发生的。

但是,远离平衡态的开放系统总存在着一个由无序走向有序的整体进化趋势。经济系统是一个远离平衡态的开放系统,它的内部存在一个自我调节和相互制约的机制。凡是在市场或政府的调节机制低效或失效的地方,经济世界还有第三种资源配置的机制在起作用,这就是社会文化或社会伦理调节机制的作用。某种道德和正义的原则和规范,通过习惯、传统和社会风气对资源的配置、财富的分配和人类的经济行为起到某种调节作用,这是人类有史以来一直存在着的一个客观事实。这在工业社会之前特别明显。即使在工业社会以后,它们也是经常起作用的机制。一个交通拥挤的城市,社会公德和社会风气的好坏对交通服务起着重要的调节作用,它不是单靠调整公共汽车或其他交通工具的票价的市场机制、或增加交通警察设施的行政调节机制就能很好解决的。环境保护问题,是不能单靠征收排污费用的经济手段、制订和实施环境保护法的行政手段来解决的,社会群体的环境意识和保护环境的社会风气同样起着重要的调节作用。至于工业社会可能存在的庞大社会福利事业,除了由政府兴办之外,许多都是私人捐赠的,像“希望工程”那样的事业,也主要是社会伦理在起调节作用。遍布我国高等学校的许多宏伟壮观的教学大楼和科研设备,并不是由看不见的手建立起来的,也不是由看得见的手(政府投资)兴建的,而是由伦理道德的手建立起来的。特别值得指出的是,伦理之手不仅能直接调节资源的配置和财富福利的分配,而且作为指导思想和价值标准,被注入企业管理的决策和政府干预调控的决策中,直接影响到企业经营管理的目标和方向,以及国家经济发展的目的和方向。社会主义市场经济下的企业经营目标不仅是为了利润,而且是为了人,为了提高人及其生活的品质,实现人的全面发展。整个国民经济发展的目标是为了共同富裕,为全体人民谋幸福。社会主义市场经济之所以是社会主义的,除了因为公有企业占某种主导的地位外,主要是因为它是社会主义伦理原则指导整个社会生产、指导社会分配和再分配。

社会伦理或社会文化对经济运作的调控,也是由一个带四个要素的反馈环来加以实现的。它通过社会传媒机构、社会舆论和社会群众监督机构,作为伦理监察机构(第九要素)将经济运作的社会伦理后果的信息传入社

会伦理决策机构(第十要素)中。社会伦理决策机构,主要是三种社会伦理运动的决策机构。这三种社会伦理或社会文化运动,第一是红色运动,解决贫富不均,反对贪污腐败和其他社会不公正的人民群众运动;第二种是绿色运动,即保护环境、反对社会公害的群众运动;第三种是蓝色运动,即促进基础理论研究、提高文化科学素质、提倡新道德风尚、建设精神文明的文化运动。它通过社会文化伦理运动的基金会的、民主程序的、各种部门的伦理委员会的以及社会风气的执行机构(第十二要素)对资源配置和经济生活发挥作用。当着市场调控与政府调控能比较正常运作之时,社会文化伦理运动的作用是改良的,否则这种伦理文化运动就会是革命的。这是世界历史上累见不鲜的事情。

以上就是我们的社会经济系统的多层次调节观或讨论的社会经济多层次控制论的三个环节和十二个要素,或十二种变量。其中有一些是软变量,有一些是硬变量。它们之中每一组要素、每一个要素的作用都是相对独立的,有自己的地位与作用,又都与其他组的要素、其他各个要素相互联系、相互作用。因此夸大其中任何一个要素或任何一个环节,或取消其中任何一个要素或任何一个环节,都会导致社会经济生活的严重破坏。例如,某种经济系统造成极大的环境污染,而行政机制又不能解决问题,反而加以助长,在这个时候如果不让社会舆论将它揭露出来,不让群众将他们的呼声表达出来,就会造成严重的破坏性的后果。传统指令性计划经济只强调第二反馈环及其五、六、七、八号要素,否定第一反馈环及其一、二、三、四号要素,结果造成经济衰退,甚至使国民经济走向崩溃的边缘;而亚当·斯密古典经济学的实践家们只要第一组要素,主张自由放任,而否定第二组要素,即五、六、七、八号要素,结果造成经济危机愈演愈烈。

当然,在现实生活中,这十二个要素之间,以及它们的相互关系之间,常常是互相矛盾的,有时甚至是相互冲突的。但社会系统本身有自己的目标,为了达到这个总的目标,必须协调各个要素之间的相互作用和相互关系。只有十二个要素各司其职、相互协调、共同推进,才能达到整体优化效应和协调倍增效应。这就是政治、经济、文化全方位的多维度、多层次的社会控制观,它不仅将人们看做“经济人”(人是自利的动物),而且看做“政治人”(人是政治动物)和“伦理人”(人是伦理动物)。人是综合的,是利己的又是利他的,是为自己的,又是为集体的、为国家利益奋斗的。人不仅有自己

的物质生活的需要,而且有自己的政治生活的需要和文化生活的需要。人们进行经济活动不仅有自己的物质利益的动力,而且有自己的政治思想动力和文化价值动力。因此我们不仅需要纯粹的经济学,而且需要政治经济学和伦理经济学。人不仅要关心自己的利益,而且要关心国家的利益和全体的利益;不仅要追求物质的消费,而且要追求整个生活素质的提高。因此,就不仅要有微观经济学、宏观经济学,而且要有全球生态经济学。这是三维社会系统和四环系统调节的必然推论。本节的讨论充分说明,复杂系统运作的多层次控制机制是与自组织机制和适应性进化机制密切结合在一起的。多层次控制系统的形成通常有一个自组织的过程,多层次集中控制的过程通常需要自组织过程与它密切配合。只是为了说明问题的方便,才将复杂系统的运作划分为三个机制。下一章,我们将要集中分析复杂系统的自组织机制。

第 9 章

系统自组织理论

在自然界、社会特别是生命世界中,我们到处看到相对稳定的系统组织、结构、形态与模式。天上的星星,地上的山川,人间的家庭、社区与市场,物理世界的雪花晶体与云层,生物世界的各种物种,它们很有秩序,但却是自发地在一定环境条件下依靠内部的相互作用而获得秩序的,没有外界强加的特定的干预,不由外部的特定指令而形成。我们将这种现象称为自组织。本章在界定自组织的概念后,研究自组织的判据、条件与机制,特别要运用计算机模拟方法考察序的形成,最后研究自组织的各种类型和自组织系统的各种表现。

9.1 自组织的概念和经典案例

对于自然界的自组织现象,哲学家们早就注意到了,中国的老子在《道德经》中就说道:“天地不仁,以万物为刍狗,圣人不仁,以百姓为刍狗”,古希腊哲学中也有所谓万物自我运动和“自己运动”之说,这都是系统自组织理论的思想萌芽。

不过在科学和哲学上首先提出自组织这个概念的应首推 18 世纪德国哲学家康德。康德试图理解自然的内在目的,认为某种外在意图并不能提供我们对这个自然目的的理解,只有自然的组成部分的相互作用才能提供我们对自然目的的理解。他说:“只有在这个条件下和这样的期间里这样的一种产物才是有组织的,并且是自组织的(Self-organized),因而被称做自然的目的。”^①他举例

^① Kant, *The Critique of Judgement*, Oxford: Clarendon Press, 1980, Part 11. § 4, p. 65. 并可参阅颜泽贤《耗散结构与系统演化》,福建人民出版社 1987 年版,第 9 页。

说,钟表虽然是组织的,但并非是自组织的系统,因为它不能自创生、自繁殖和自修复,而要依靠钟表匠。

同样在 18 世纪,英国经济学家亚当·斯密在他的《国富论》(1776)中论述了一个无人关照的社会福祉怎样在一种相互作用的均衡中达到。对于这个模型,斯密写道:“每个人都在力图运用他的资本来使其产品得到最大的价值。一般说来,他并不企图增进公共福利,也不知道他所增进的公共福利是多少。他所追求的仅仅是他个人的安乐,仅仅是他个人的利益。在这样做时,有一只看不见的手引导他去促进一种目标,而这种目标决不是他所追求的东西。由于追逐他自己的利益,他经常促进了社会利益,其效果要比他真正想促进社会利益时所得到的效果为大”。^①

到了 20 世纪的 60 年代,自组织问题已经不是 18 世纪近代科学中的目的整体论与机械还原论的竞争与协调问题,而是在系统科学发展的第二个阶段去解决复杂自组织系统形成过程中一系列深层次的问题。关于这一阶段自组织理论的建立和发展状况,我们已在第 2 章中做过阐述。

▷▷ 9.1.1 自组织的概念

关于什么是自组织,系统科学家们有许多不同的定义,^②我们可以选择

① 亚当·斯密:《国富论》(1776) 转引自[美]保罗·A. 萨缪尔森、威廉·D. 诺德豪斯:《经济学》(第 14 版),胡代光等译,北京经济学院出版社 1996 年版,第 62 页。

② 哈肯说:“如果一个体系在获得空间的、时间的或功能的结构过程中没有外界的特定制约,我们便说该体系是自组织的。这里‘特定’一词是指,那种结构或功能并非外界强加给体系的,而且外界是以非特定的方式作用于体系的”。(H. Haken, *Information and Self-organization*, Springer-Verlag, 1988. P. 11. 转引自吴彤《自组织方法论》,清华大学出版社,第 5 页) Gary William Flake 在他著名的复杂系统教程 *The Computational Beauty of Nature* 中写道:“自组织是高阶结构或功能模式的自发形成,它是通过低层次客体之间相互作用而产生的突现”(A. Bradford Book. The MIT Press, p. 463.)。F·海里津在为生命支持系统大百科全书写的《自组织与适应性的科学》条目中写道:“自组织可以定义为由于局域相互作用而导致的一个全部相干的模式的自发创生 (Spontaneous creation) 和自发突现 (Spontaneous emergence)”(F. Heylighen (2002). “The Science of Self-organization and adaptivity.” *The Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford: EOLSS Publisher. <http://WWW.eolss.net>.)。而美国 Oregon 大学 Alder Fuller 博士指出:“自组织是序在网络中自发产生的过程,它没有(像自然选择这样的)外界组织力施加于这个系统,也没有内部的组织者(像 DNA 作为指令等)或生命力施程序于系统中来形成的”(<http://WWW.prototista.org/in-oles.htm>)。国际系统科学研究会前任会长、美国纽约州立大学系统科学系主任

归纳如下:所谓自组织,就是通过低层次客体的局域的相互作用而形成的高层次的结构、功能有序模式的不由外部特定干预和内部控制者指令的自发过程,由此而形成的有序的较复杂的系统称为自组织系统。因此,自组织的关键问题就是一个系统从混沌到有序以及序的增长何以可能的问题,而为了解决这个难题,我们对于自组织的概念,必须先做下列几点说明:

1. 自组织系统首先是一个有组织系统,即以有秩序的方式、有相对稳定的结构功能模式的方式存在着的系统。因此,我们需要首先给出这个有秩序程度的一个度量,一个判据。我们首先来想一想,最没有秩序即最无序的是什么东西?可以想像,处于热平衡状态的理想分子的运动是最混乱无序的东西,这个系统的熵 H 达到最大,记它为 H_m 。这样我们取系统熵 H 和系统最大熵 H_m 的比值 H/H_m ,把它视做是系统混乱度的量度,叫做相对熵。这个数值越小,混乱度就越小,如果这个数值等于 1,即系统熵等于最大熵时,这个系统的混乱度达到最大程度。因此一个系统的有序度,或有组织程度,可以用信息论创始人申农的“剩余度”来表示:

$$\gamma = 1 - \frac{H}{H_m}$$

这里 γ 又称为有序度 (degree of orderliness)。

2. 自组织系统必须是这样一个系统,在它的形成和发展过程中,其有序程度随时间推移而增加。这就是说,自组织系统和自组织过程必须满足下列的公式:

$$\frac{d\gamma}{dt} > 0$$

因 $\gamma = 1 - \frac{H}{H_m}$, 故有:

$$\frac{d\gamma}{dt} \left(1 - \frac{H}{H_m}\right) > 0$$

George J. Klir 在他的《系统科学概论》中则写道:“一个自组织系统就是这样的—一个系统,它通过使自己的元素更好地组织起来,而在时间的过程中能改进自己对所要达到的目标的实现。这个表述包含了一个特别的场合,其中它的目标是要从相关实体的低阶组织(无序、混沌)达到一个相关实体的高度的组织(序)。在这种场合,组织的‘善’被看做是以某种适当方式定义的有序度。”(Facets of Systems Science, Kluwer Academic/plenum publishers, 2001, p. 185.)

解这个微分式,即得: $H(\frac{dH_m}{dt}) > H_m(\frac{dH}{dt})$

在这个不等式中,为了使等式成立, $\frac{dH_m}{dt}$ 要增大,表示系统要不断增加它的元素,相当于从环境中吸取营养,壮大自己的规模,这是自组织;而 $\frac{dH}{dt}$ 需要缩小,表示它要从环境中引进负熵,并从环境中获得信息,提高适应环境的能力,这也是自组织。关于这个问题,我们将要在后面进行详细的讨论。

3. 自组织过程必须是一个不由外界干预也不由系统控制者的特定指令而形成的过程。首先,自组织不是在外界特定干预下形成的,它是一个自发、自主的过程。例如自由恋爱形成家庭是一个自发自主的过程,它不是由外界例如父母之命、媒妁之言强加于他(她)们而组织起来的。后者称为他组织。大约在200年前,英国的威廉·佩利(William Paley)就反对自组织这个东西,在他的《为设计做辩护》一文中就争辩说,复杂的有组织的系统是不能自发地突现出来的;你如果在海边看到一只手表,你会假定它是由钟表匠制造出来的。但佩利错了。达尔文的进化论与当代的自组织理论表明,进化和自组织虽然不能创造出一只表,但它能创造出钟表匠。世界除了他组织之外还有自组织。其次,所谓自组织,除了不是由外界干预的组织之外,也不是根据系统中的控制者的特殊指令组织起来的。这些组织起来的系统是具有中央控制器作为组织者的系统,而自组织系统的一个特点就是由系统元素中局域性的相互作用引起,虽然没有哪个组元可以处于控制地位,但它们的局域性相互作用仍然出其不意地协同产生复杂性的有序模式。

组织性,由无序到有序以及由有序到更加有序,序的分布式的自发产生,就是自组织概念的三个要点。

▷▷ 9.1.2 自组织的经典案例

自组织的现象主要存在于生命世界以及与生命有关的现象中,但在物理化学的世界也存在。科学的研究是从对简单现象的研究开始,再进到复杂现象,因此研究自组织现象有几个典型案例被反复运用,这就是布鲁塞尔学派普利高津反复谈到的流体动力学中的贝纳德元胞(Benard cells)以及

化学反应系统中的贝罗索夫——扎鲍廷斯基反应(Belousov-Zhabotinsky reaction),它被美国科学家称为布鲁塞尔器。还有哈肯所集中研究的激光的形成。本节中,我们首先研究前两个案例。

所谓贝纳德元胞,是1900年法国物理学家贝纳德从容器底部进行流体加热实验时发现的对流元胞自发形成的一种自组织现象。我们可将该实验分四步来进行考察:

1. 在一个平底金属盘子中装上一些液体,例如水或某种有机溶液。首先在常态下观察这些液体。这时液体既没有整体运动,也没有同外界的温度差。液体是完全均匀的,从哪个地点和从哪个方向去看它都是一样。它们是对称而有序的。如果我们用 T_1 和 T_2 分别代表两个不同液层的温度,则有:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 0 \quad \text{..... (9.1)}$$

我们称这时的液体系统状态为平衡态。

2. 从盘子下面给液体徐徐加热,液体内部就会产生温度梯度。设下层温度为 T_2 ,上层温度为 T_1 ,由于液体从底部吸收热量,又从上面放出热量,所以 $T_2 > T_1$,因此

$$\Delta T = T_2 - T_1 > 0 \quad \text{..... (9.2)}$$

由于外界向体系输入能量(加热),式(9.1)的平衡条件被破坏。

若 ΔT 小于某个特定值,液体处于线性近平衡态,这时系统开始出现热传导,其机制是分子不通过宏观运动而仅与分子发生碰撞,通过热振动并传递一部分热能量。即热量通过热传导的方式由下向上输运,这个输运的变化是线性的。

3. 继续加热,当温差 ΔT 达到某一特定值、即临界点 ΔT_c 时,整个液层自发地、迅速突然地开始做整体运动,而且这一运动远不是无序的。微观的随机运动自发地形成全局性的宏观有序运动。在确定的地方液体往下沉,在另外一些地方液体往上浮,形成非常有序的对流元胞——贝纳德花纹。

如果金属盘子是圆形的,但上部没有加盖,液体直接接触空气,这时的液体会自行出现许多有序的六角形对流元胞。从盘子的上部往下看,可以看到像蜂窝一样的许多六角形格子(如图9.1),在每个格子的中心的流体往上流,在它们之间的边缘上流体往下沉。

如果盘子是长方形的,在液层上部有一块很平的盖板,流体被限制在上

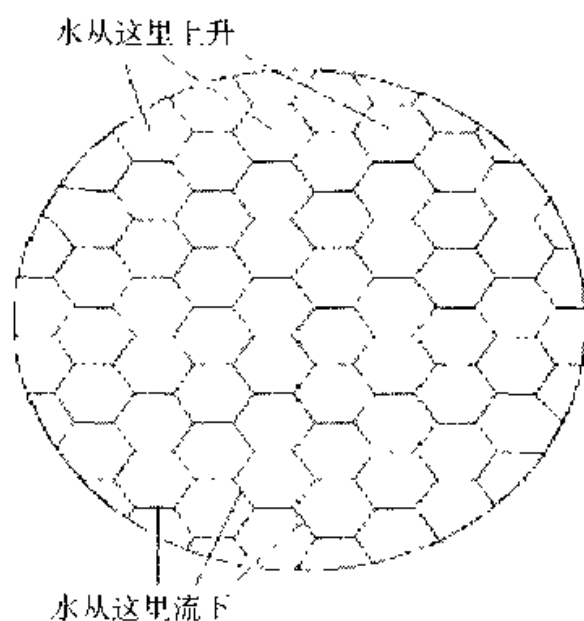


图 9.1 六角形贝纳德元胞

下两块平板之间,那么对流运动会形成许多滚动的圆柱。这些圆柱平行于长方形盘子的短边,并且两个相邻的圆柱的滚动方向相反(9.2)。这就是自发的对称性破缺。

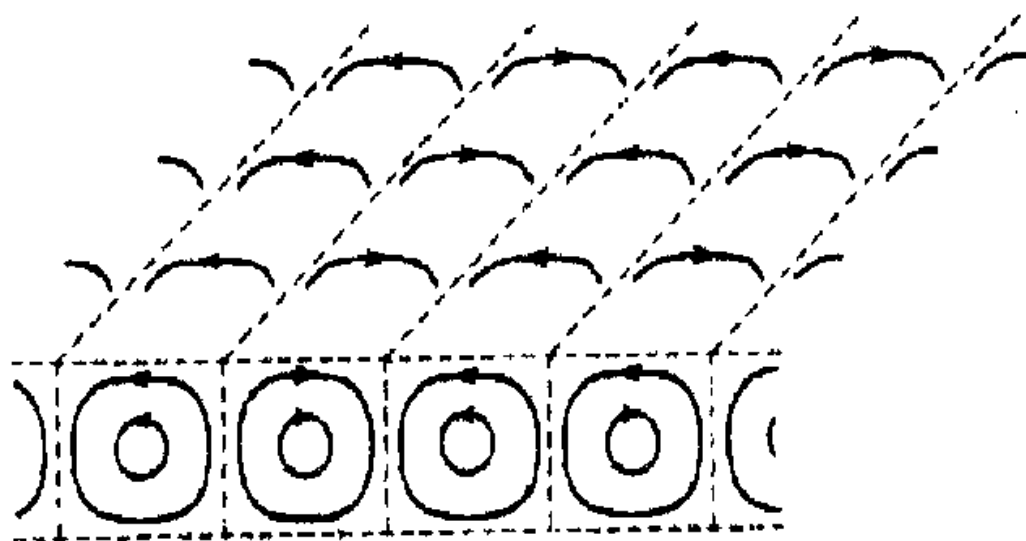


图 9.2 滚动圆柱形贝纳德花纹

对于这种元胞,小的扰动对它不起作用,但大的扰动会引起元胞运动的滞后现象。这就是说,元胞“记忆”了它的历史。对这种元胞的分析表明,

微观层次的决定性规律产生了宏观元胞的非决定性排布。你在同样的实验装置上重复实验,不会得出相同的结果,在同样的某一个特定的点上,有时得一顺时针转动的元胞,有时却得到逆时针转动的元胞。这表明,边界条件上的微小扰动会产生宏观的显著效应,这就是我们前面所说的“蝴蝶效应”。这也就是说,当对流出现时,温度达到一个临界点,在这里有序结构的发展发生了分叉。

4. 再继续加热,当温差超过另一个临界值 $\Delta T_c'$ 时,突然地将会看到一个新的强有力的随机性表现形式:这时原有结构变得模糊不清,呈现出一个以各变量不规则地依时间变化为特征的动态,这就是所谓湍流的前兆,即液体演化为一种混沌状态。

另一个典型的自组织案例是贝洛索夫—扎鲍廷斯基的化学振荡反应,简称为BZ反应。

1951年,苏联化学家贝洛索夫(B. Belousov)以铈(Ce)离子为催化剂进行柠檬酸被溴酸盐氧化的试验。结果表明,在一定的条件下(在反应物临界浓度下),某些反应介质(如铈离子)的浓度突然地能随时间做周期性的变化,造成混合物的颜色在黄色和无色之间周期性地交替。黄色是由 Ce^{4+} 离子造成,而无色是由 Ce^{3+} 离子造成。这是怎么一回事呢?按热力学第二定律,分子的运动应该走向平衡态,怎么会出现一个非平衡的有序的结构呢?贝洛索夫1951年发现了这种违反经



贝洛索夫(B. P. Belousov)

典平衡态热力学的非线性化学振荡器,他一直想公布这个发现,却被杂志主编认为是“不可能的”而不予发表。后来他所在的理论与实验生物物理研究所的负责人斯克诺尔(S. E. Schnoll)将他的发现含糊地发表在一篇杂志的消息摘要里,并于1961年将这个课题交给他的一个研究生扎鲍廷斯基进行研究。扎鲍廷斯基重新发现了这个反应,他又以铈离子做催化剂,在硫酸溶液中让丙二酸(Malonic Acid)被溴酸(BrO_3)氧化,结果不仅看到反应介质时而变红、时而变蓝的周期性变化,而且在不加搅拌的情况下还可以看到

红蓝相间的空间构型,以及红蓝相间的扩散波。以后这一大类反应被称为B—Z反应,或叫化学振荡反应。

显然,B—Z反应揭示了一种时间有序结构——“化学钟”,空间有序结构——“化学纹”,以及时空有序结构——化学纹的周期变化,即“化学波”。这些有序结构的维持依赖于某种外界的条件(不断加入反应物,取走生成物以保持两者特定的浓度),但是其具体形式却不是外界约束直接决定的,而是系统内大量分子相干变化的结果。这种分子间的“长程关联”同样是平衡态热力学和概率论所不能解释的,就像我们很难想像几百万个黑色或白色乒乓球的混合体会有规律地在其表面突然呈全黑一样。

从左到右:在没有被搅动(过)的亚铁菲绕啉离子丙二酸层的BZ反应中传播氧化波。

当波破裂时,有一对螺旋形的波在该点出现。

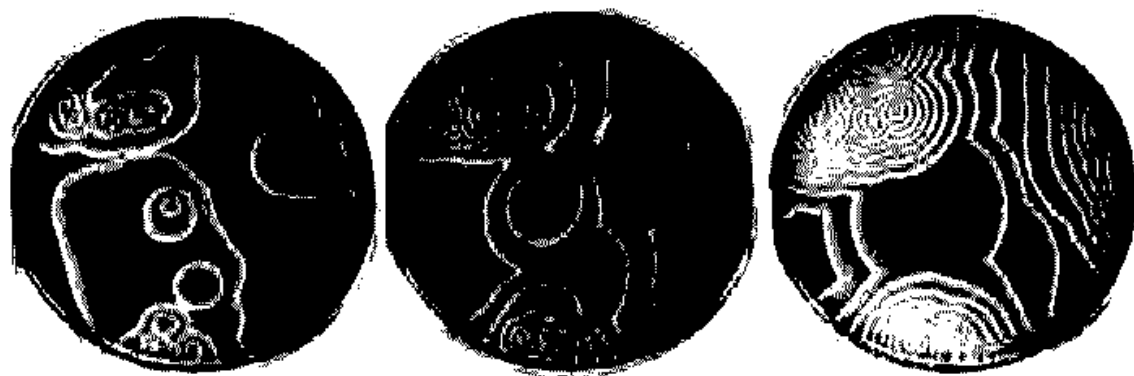
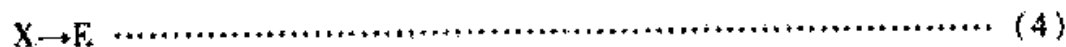
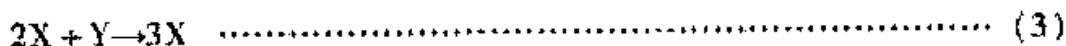
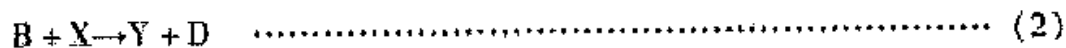


图9.3 B—Z反应物二维层中的波传播

本图包括同心圆形与旋转螺旋状的波,以及这些波的干涉。

为了抛开B—Z反应的具体机理,又能抓住化学振荡的本质,普利高津等人提出了一个能模拟广泛的自组织行为而在数学上便于处理的反应模型——“布鲁塞尔器”。其化学反应的模式是:



从上式以及图9.5可以看出,其中A,B是反应物,其消耗可由外界不

断补充;D,E 是生成物,一经生成,即被取走;X,Y 是中间生成物,其浓度随时间而变。四组反应都与 X 相关:其中第一、第三组反应使 X 增加;第二、第四组反应使 X 减少。两组反应与 Y 相关:其中第二组反应使 Y 增加;第三组反应使 Y 减少。化学反应是通过分子间的碰撞而发生的,其碰撞数与反应分子浓度的积成正比,碰撞次数越多,反应物浓度越少,生成物的浓度越大。假定动力学常数为 1,整个反应的动力学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = A - BX + X^2Y - X \cdots \cdots (1) \\ \frac{dY}{dt} = BX - X^2Y \cdots \cdots (2) \end{cases}$$

考察微分方程(1), $\frac{dX}{dt}$ 是 X 分子的浓度的变化。方程右边的四项,分别对应“布鲁塞尔器”四组反应。在四组反应式中凡是用加法来表示的,在(1)式右边使用乘积来表示,例如 $B + X \rightarrow Y + D$ 表示 X 浓度减少率与 BX 的乘积成比例,在其他情况不变下, $\frac{dX}{dt} = -BX$ 。(1)、(2)二式其他各项的求得由此类推。

$$\text{令 } \frac{dX}{dt} = 0, \frac{dY}{dt} = 0, \text{ 求得上述联合方程组的定态解 } X_0 = A, Y_0 = \frac{B}{A}$$

在定态点附近对系统做线性稳定性分析,结果如下:

当 $B < 1 + A^2$ 时,定态解是稳定的,从不同初始状态开始的运动轨迹线最后都回归于定态点这个“吸引子”。

当 $B > 1 + A^2$ 时,定态解不再稳定,从不同初始状态出发的运动轨迹线最终将进入同一周期轨道(“极限环”)。在极限环的不同位置上,X,Y 有不同的浓度。这样随着时间的不同,系统处于极限的不同点上,X,Y 的浓度也就发生周期性的变化(“化学钟”)。如果在动力学方程中加上扩散项,还可以进一步得到“化学纹”和“化学波”。

布鲁塞尔器最大的特点是其中包含着自催化和交叉催化反应: $2X + Y \rightarrow 3X$,是自催化; $B + X \rightarrow Y + D$,是交叉催化,即 X 由 Y 产生,同时 Y 又从 X 产生,两种不同的产物相互催化对方的合成物。这种反应可用图 9.4 来表示。

本图进行数值积分的初始条件为(1) $X = Y = 0$; (2) $X = Y = 1$; (3) $X = 10, Y = 0$; (4) $X = 1, Y = 3$;式中总取 $A = 1, B = 3$ 。S 点对应于不稳定的稳态

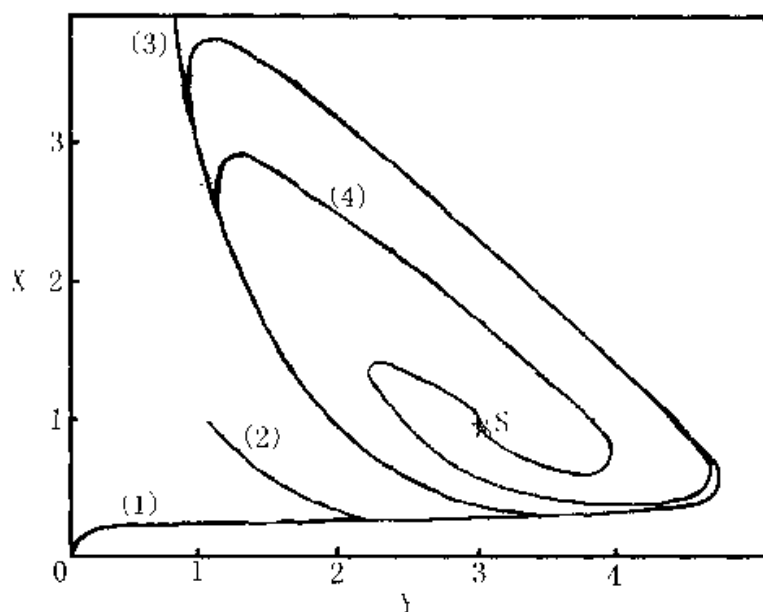


图 9.4 布鲁塞尔器的极限环示意图

(X_s, Y_s) 。无论选择什么初始条件, 系统都将趋向一个确定的周期振荡解, 即“极限环”。

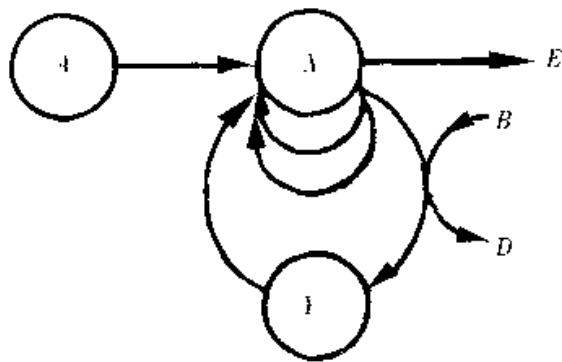


图 9.5 布鲁塞尔器中的自催化和交叉催化

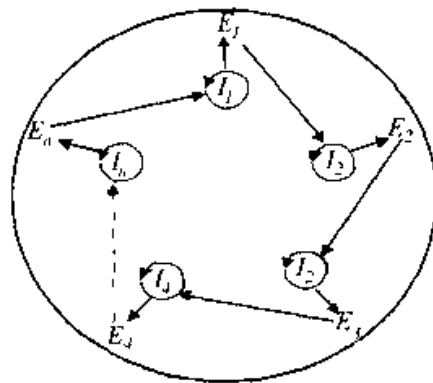


图 9.6 二级超循环模型

这种自催化和交叉催化反应是一种典型的包含正反馈的非线性行为, 而且它在分子生物学中是极其重要的。核酸与蛋白质之间的关系可以用一种交叉催化效应来描述: 核酸含有产生蛋白的信息, 而蛋白质反过来又产生核酸。艾根进一步把这种交叉催化效应概括为超循环。核酸的自我复制本身就是一种催化循环, 蛋白质是其催化剂, 而这些催化剂又构成经核酸翻译的循环, 产生了蛋白质本身。设核酸为 I , 蛋白质为 E , 则它们的超循环可用

图 9.6 来表示。当然,超循环不局限于上述化学或生物学中的交叉催化反应,它有更一般的自组织原理的意义。用艾根的话来说:“超循环是一个自然的自组织原理,它使一组功能上耦合的自复制体整合起来并一起进化。”^①它显示了我们后面将要讨论到的复杂系统之间的共生现象。从大分子到原始生命,从原核细胞到真核细胞,从单细胞到多细胞,从种群到生态系统,这一系列进化都包含了共生与超循环的机制。

以上我们通过对普利高津学派的典型例子的分析,对自然界演化过程中的一些自组织现象进行了初步的概括。那么,在这些范例和相关的现象中有什么共同的东西呢?下面我们将对耗散结构形成的自组织机制开展进一步的探讨。

►► 9.2 自组织的条件与机制:远离平衡态 开放系统中的非线性相关

对于自组织及其序的形成的条件和机制,不同的系统科学家有不同的分析。普利高津学派强调的是开放系统的远离平衡态的动力学行为以及组成元素之间的非线性相互作用(Nicolis and Prigogine 1989),而 H. V. 福莱斯则强调噪声、涨落以及分叉的作用(H. V. Forrest 1960),哈肯特别提出了一种竞争性的协同机制(H. Haken, 1986),而近年圣菲研究所霍兰、考夫曼等人则特别强调简单的局域相互作用的受约束生成,从而显现出它的突现特征,并强调适应性的作用(J. Holland 1998, Kauffman, 1993),而 F. 海里津则在自组织与中央集中控制组织的比较中强调分布式控制在自组织中的作用以及由此导致的系统的鲁棒性特征。本节和下一节将在这些看法中理出几个要点来加以讨论:

▷▷ 9.2.1 自组织是开放系统远离平衡态的动力行为

我们在本书 4.3.4 中讲过,热力学上有一条第二定律:“热量总是由温度较高的物体流向温度较低的物体,而不能自发地由低温物体流向高温物

^① M. 艾根等:《超循环论》,曾国屏、沈小峰译,上海译文出版社 1990 年版,第 3 页。

体”(见本书第126页)。也就是说,在封闭系统中,熵,或者说无序度总是趋向增加,增到最大。在日常生活中,我们看到这种现象:两个有温差的物体通过热传导,总是达到平衡,叫做热平衡态。滴在清水中的墨水倾向于均匀分布,我们从未看到扩散于一盆水中的墨水会集中起来,跳出水面,返回到钢笔尖里。由于对付不了熵增的压力,动植物的生命个体总是趋于死亡、腐朽和瓦解,我们从未看到已死亡腐烂的人体会重新获得新生。按照计算,如果我们能够利用海水的热量由低温流到高温来做功,只要将海水温度降低 0.01°C ,就足够全世界的工厂全部开工1700年!但这些都是不可能的,在封闭系统中熵与无序总是趋于极大。

这样看来,生命、细胞、新陈代谢以及多细胞有机体这样的有序复杂结构,连同我们上面所说的自组织典型案例——对流层六角元胞以及BZ反应的“化学钟”不也是不可能了吗?它们何以可能呢?这里因为自组织发生的条件是在开放系统中,所谓开放系统就是与环境有能量和物质交换的系统。在开放系统中,系统的熵的变化 dS ,由两个部分组成,一个部分是系统内部产生的熵,记作 d_iS 。由于热力学第二定律的作用,这个内部熵总是增大的,即 $d_iS > 0$ 。另一个部分是从外界环境中输入的熵,记作 d_eS 。它可大、可小。这就是说开放系统的熵 $dS = d_iS + d_eS$ 。如果 dS 为负值,即 $dS < 0$,就意味着系统朝有序的方向发展。要使这个不等式成立,就需要 $|d_eS| > d_iS$ 。这里 d_eS 是负熵。一个系统如果是封闭的,就会很快耗尽它的自由能,达到热力学平衡(thermodynamics equilibrium)的“热死”状态,即最大熵状态。因此,由环境向一个系统输入自由能(即能做功的能量)或简化地说输入能量,就等于向这个系统输入负熵,使它离开热平衡态。这里并没有违反热力学第二定律,因为系统——环境的大系统,熵还是增加的。

因此,自组织的第一个条件便是系统是一个远离平衡态的系统。为了保持系统远离平衡态,必须由环境持续向系统输入能量或低熵物质,使系统及其元素处于一个动态过程,经过一系列循环的变化,以低能高熵的物质与能量形式从系统中输出。这就是以不同形式出现的“新陈代谢”。这就是自组织的条件。例如一个动物与其环境进行不断的物质能量交换,它以环境的食物(低熵物质)为生,并排泄出废物(高熵物质),从而产生和保持自己的有序结构。一个生态系统靠阳光和矿物质繁衍兴旺,阳光和矿物质通过植物及其叶绿素转化为有机物,有机物又通过动物、细菌和腐食菌类等中

间媒质转化回矿物质和热量。虽然这些矿物质以及氧、水、二氧化碳之类的物质可以循环再生,但相当大部分的太阳能却耗散了,不能再利用了。在我们上节所举的案例中,贝纳德元胞这种有序结构的产生和保持,是依赖溶液容器底部的加热、不断输入能量并从其表面以热的形式散发出去这样的物质与能量的交换。而 B—Z“化学钟”这种有序结构的形成与保持,也是不断输入低熵的物质与能量和取走其产物的结果。当然,远离平衡态只是一个定性的说法,它的基本意思是并非平衡态和近平衡态,离开平衡态和近平衡态足够的距离以免于遭受平衡条件的破坏。今天看来,普利高津的远离平衡态的度似乎应该是上一章所说的混沌边缘的 λ 数值。

▷▷ 9.2.2 从局域到全局扩展的非线性相互作用

自组织的条件必须是远离平衡态的开放系统,必须在环境中有一个物质与能流通过这个系统。但这只是自组织的环境条件,而自组织的进路不是由上而下、由外而内的 top-down 进路,它是一种自发的组织,是由下而上,即经由 bottom-up 的进路进行的组织,所以我们对这个非线性相互作用的研究首先要注意的是以下几个方面。

1. 自组织是一个由组成元素或行动主体局域的相互作用进展到形成全局性的秩序的过程。自组织起源于系统组成元素或个体的行动主体之间的自发的相互作用,这个相互作用在开始的阶段是在一个局部的范围里发生的,也只能达到局部而不是全局的范围。在贝纳德卷筒形成之前,即在上节所讲的贝纳德实验的第(1)、第(2)阶段,热传导只是通过分子与分子之间的短程的相互碰撞的作用而进行,单个分子只影响附近的少数几个分子。而在上章所讲的例如生命游戏的相互作用中,每一个作为初始状态的元胞,只与 8 个邻域元胞可能有相互作用,而事实上影响这个元胞成为活的实际邻域元胞的状态数目只有 2 个到 3 个。研究自组织的计算机模型通常都采用以个体为基础的模型(individual-based models)。

这种相互作用的局域性来自物理过程的基本连续性以及因果过程的近距性(不存在“超距作用”)。这就是说,从一个区域到任何另一个区域的影响都必须通过中间的区域进行传播,受中间区域的干扰。在贝纳德的实例中,分子的相互作用超出一定局域范围,中间区域的分子随机的涨落就会干扰它,驱散它。即使它偶尔形成一些小卷层,很快也就被驱散了。这里我们

假定系统是从无序开始。在这最初的整体无序的状态里,系统中远离的部分基本上是独立的,它们不互相影响。知道一个局域性的组分及其相互作用构型的信息,不能推出另一个区域构型的信息。

但是,当元素之间的局域性相互作用进展到全局性的相互作用之后,情况便发生了根本的变化。在圆柱形贝纳德滚筒的对流层宏观运动中(见图9.2),如果一个人知道卷筒对流层一边的分子运动是下行的,而在卷筒的另一边,分子是上行的,又因为所有卷筒的大小和形状是相同的,同时他知道一个卷筒中分子运动的旋转方向是顺时针的,他就会预见到邻近的一个卷筒旋转运动的方向是逆时针的。如此类推,他可以预测到任何地方的运动,无论这个运动离他知道的卷筒的位置有多远。这是因为,这时流体运动已经形成了宏观的规律或全局序,它的行为服从于这个宏观规律或全局序。而生命游戏之所以显示出全局的有序和生命的突现,则是经过对局域相互作用做出几千次或几万次叠代重复运算的结果。

在研究这种从简单的受约束的局域相互作用到全局序的生成过程中,有两个度量需要注意,其中一个就是 F. 海里津提出的局域性相互作用的关联长度(correlation length),^①它是研究自组织过程中从无序到有序的一种有效的度量。它可被定义为元素之间有意义关联(或有序关联)的最大距离。对于贝纳德卷筒对流层来说,当贝纳德容器底盘板没有加热、整个液体温度均匀时,这个关联长度为零。当热传导的有序状态扩展到整个液体的所有部分时,其关联长度等于整个容器的直径,而在居间的阶段流体处于自组织的过程,其关联长度由小到大。另一个是美国新墨西哥大学生物系德克尔(Ethan H. Decker)教授提出的关联的元素数量,即参与自组织的元素或行动主体的数量。^②当局域相互作用的元素发展到全局序时,参与自组织的元素或行动主体通常是很多的。例如细胞、生命组织、免疫系统、脑中的神经元、人口中的行为主体、经济系统中的个人、生态系统中的物种的群体与个体,其数目通常有从数百到数亿。不过由于研究自组织的建模是个体基础建模,而不是传统系统模型中的群体层次建模,像研究理想气体规律的模

① F. Heylighen (2001), "The Science of self-Organization and Adaptivity". *The Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford: EOLSS Publisher. § 3.2.

② Ethan H. Decker(2001), "Self-Organizing Systems: A Tutorial in Complexity." <http://WWW.ncst.ernet.in/kbcs/vivek/issues/13.1/sos/sos.html>.

型那样,每立方厘米有 10^{23} 个原子数(阿佛加德罗数),而自组织系统的元素数目是“中间数目”,通常在 3 至 10^{23} 之间。这个数量的提出是考虑到我们目前的计算机模型能够处理依自身局域规律行动的大量的个体元素,做出亿次以上的叠代运算,使我们有可能定量考察自组织和突现的机制。

2. 非线性的相互作用

自组织之所以能够发生,是因为系统的元素之间以及元素与结构之间存在着一种非线性关系或非线性的相互作用,从而在数学上需要运用非线性方程、非线性动力学来解决。

为了理解非线性这个概念,我们首先需要了解什么是线性关系。关于这个问题,我们在第7章中讨论复杂性的特征时已经提过,现在做一点较为详细的讨论。

所谓两个元素或两个变量成线性关系,在数学上说也就是它们成直线关系,成比例关系,从函数关系上说是因变量的输出 y 正比于自变量的输入 x ,即 $y = ax + b$,从因果的关系说是结果与原因成正比。比如你用大一倍的力踢一个球,则这个球的加速度也增加一倍。在部队作战中,如果投入一个师发挥一定战斗力,再投入一个师则发挥两倍战斗力,投入 n 个师就有 n 倍的战斗力。这就是战斗力与士兵数量成线性关系。

因此,用数学关系来表现,线性相互作用遵循下列原则:

(1) 加和性原理: $f(x + y) = f(x) + f(y)$

(2) 均一性原理: $f(ax) = af(x)$

二者合起来,称为叠加原理(the principle of superposition)。由于叠加原理和成比例的关系,在线性关系中系统的行为是很容易预测的,即所谓“知道了它的过去,就知道它的现在,知道它的现在,就知道它的未来”。但是由于线性叠加,整体等于部分和,无序的组成元素便形成不了有序的结构,而已有的结构与模式由于线性关系也提高不了有序的有组织的关系,这是不能自组织的。

所谓非线性关系,就是系统的行为不能表达为描述它的线性函数,不能简化为线性的相互作用。在数学上它不满足叠加原理,元素之间的关系、元素与结构之间的关系、因变量与自变之间的关系不成比例。小原因可以有大大结果,大原因可以有小小结果。在上节的贝纳德热传导对流层的形成中,开始时,即在(1)、(2)阶段,温度的小小上升,液体分子的热骚动就有小小的

增加,分子的热传导运动也有小小的增加;但达到一个临界点,小小的温差的增加却导致对流层的宏观巨大的运动,导致一个耗散结构,即六角形元胞或滚筒形元胞的宏观结构的出现。因此这种相互作用是非线性的。前面讲到军队的战斗力与士兵数量成比例的线性关系,但是一个军师的空城计便不费一兵一卒,只有诸葛亮一两个人轻摇鹅毛扇便可以击退敌人千军万马,这就是一个战略策略的非线性结构。在生态系统中,一个相对稳定的生态系统内一个小小的外来物种的入侵就会导致整个生态系统发生翻天覆地的大变化。在第7章讨论的元胞自动机,例如在康威生命游戏中,元胞的每一个变化都是非线性的。每一个活元胞有多于三个活元胞邻居则死,而少于两个活元胞邻居也不能活,它与邻居死活数量的关系是非线性的。正因为这种非线性的相互作用,才演出了一幕一幕的复杂多变的自组织构型来。

3. 正反馈环和负反馈环

自组织过程的非线性相互作用的主要表现形式是系统的组分之间以及系统的组分和结构之间存在着反馈关系,包括正反馈环和负反馈环。所谓正反馈,就是系统输出的信息馈回到输入端,起到加强或放大系统初始输入的效应。例如在贝纳德的对流层形成的过程中,开始只有少数一些分子沿着贝尔纳元胞做对流循环运动,这个运动的速度由此得到增强。这个分子宏观运动愈加强,就有愈多要释放自己能量的分子跟随这个元胞运动,直至如普利高津所说的贝纳德容器中的“数以百万计的分子协调一致地运动,形成具有某种特征尺度的六角形对流格子”这样的“系统复杂的空间组织”,^①分子及其能量的资源用尽,这时系统已经达到了一种稳定态,因为它的速率在条件不变的情况下不可能再有进一步的生长,所以惟一可能的变化就是进到这个占优势的构型。但是,只要有一些组分因扰动或涨落而从这个构型偏离,加强这个构型的同样的力量就会立刻制止这种偏离,将它带回稳定的系统。所以,贝纳德元胞对流层通过负反馈而稳定下来。同样,在BZ反应中,“布鲁塞尔器”的方程(1) $A \rightarrow x$ 以及方程(3) $2x + y \rightarrow 3x$,或

$\frac{dx}{dt}|_{(1),(3)} = A + x^2y$,是一个自催化方程,催化剂 x 的反应物又卷入了自身的

① 伊·普利高津、伊·斯唐热:《从混沌到有序》,曾庆宏、沈小峰译,上海译文出版社1987年版,第186页。

合成过程中,这是一个正反馈环导致 x 的不断加速增长的情形。但“布鲁塞尔器”方程(2)、(4)即 $B + x \rightarrow y + D$ 和 $x \rightarrow E$, 或 $\frac{dx}{dt}|_{(2),(4)} = -Bx - x$ 则是一个负反馈环。中间产物 x 的浓度越增加,减弱这个浓度的速率就越大。这两种反馈进到某个“稳定点”或“极限环”,从而形成“化学钟”、“化学波”的有序结构。

在更为复杂的自组织系统中,会出现多重的正反馈和负反馈环,有一些方向的变化被扩大着,而另一些方向的变化则被抑制着,从而导致系统的复杂的结构与行为。我们可以用生态学中的一个典型例子来说明这个问题:在加拿大北部沿哈德森湾生长着一种野兔,根据历史记载,自1800年以来,这种野兔的数量经历了几次大的起伏变化,变化周期大约为24年。生态学家指出,这种野兔周期性的变化是生物之间相互制约的结果。原来这一地区还有一种山猫,它是野兔的天敌,以食野兔为生,它的数量上的变化与野兔数量上的变化组成有五个反馈环的系统(图9.7)。这就是系统的内部非线性结构。研究本图时请注意:这里箭头 $A \rightarrow B$ 表示由 A 到 B 有因果关系,称为因果箭,它有正因果关系和负因果关系之分。 A 增加引起 B 增加或 A 减少引起 B 减少是正因果关系,记作 $A \xrightarrow{+} B$ 。而 A 增加引起 B 减少或 A 减少引起 B 增加是负因果关系,记作 $A \xrightarrow{-} B$ 。因果关系或因果箭可传递。 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 就是以 A 为远因的一条因果链,其结果为 D 。凡包含零个或偶数个负因果箭时,该因果链呈正极性;凡包含奇数个负因果箭时,该因果链为负链。一个因果链首尾相接,称为因果回路或反馈回路,即反馈环。凡包含零个或偶数个负因果箭时,该回路为正反馈环,而回路含负因果箭个数为奇数时,该回路为负反馈环。正反馈环有自我加强、自我大促进、自我催化的作用。负反馈环有自我抑制、自我调节和稳定系统的作用。现在回到图9.7。在系统初始阶段,野兔的总数很少(图9.7(b)A点),因此,可供山猫吃的也很少,于是山猫大量死亡。在正反馈环3中,最后导致被山猫吃掉的野兔进一步减少。当野兔死亡数小于生长数时,于是反馈环1开始起主导作用,进入图9.7(b)所示的由 A 到 B 的野兔指数增长时期,而总数的激增,可供山猫吃的野兔数量也大大增加,到了一个转换点,正反馈环3代替环1起主导作用,野兔大量被吃掉,导致负反馈环2的强度大于正反馈环

1,于是系统进入图 9.7 中由 B 到 C 的阶段,野兔数量成指数地减少。这个系统的特点是:两个正反馈环通过一个负反馈环耦合在一起,其主导作用通过负反馈环互相转换,从而使系统呈现大幅度的波动特征。

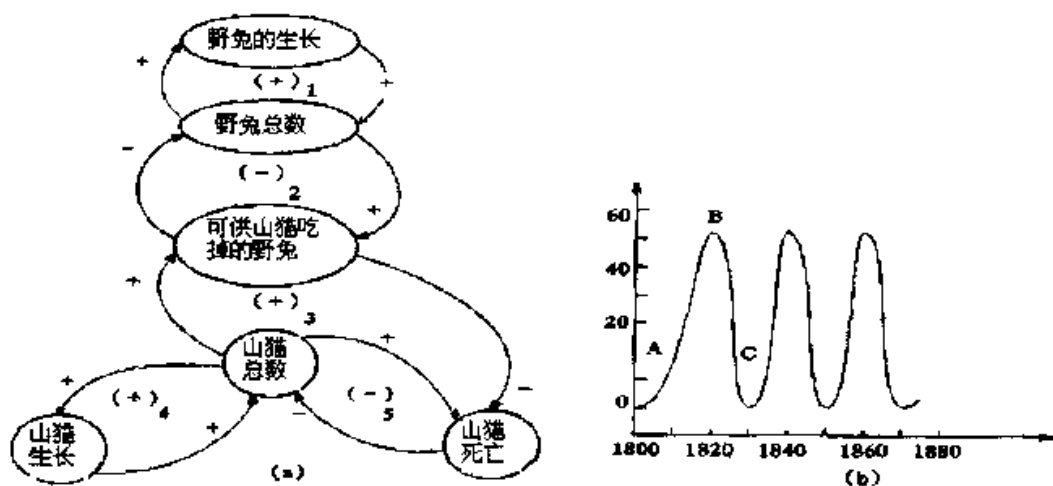


图 9.7 野兔生长系统的结构与行为

►► 9.3 涨落、分叉与协同作用

在上节中,我们已讨论了自组织的非平衡态开放性条件和非线性相关的机制,本节将进一步讨论自组织的涨落、分叉机制和协同作用机制,主要讨论三个问题:(1)涨落与分叉;(2)协同作用;(3)分布式控制和鲁棒性。

▷▷ 9.3.1 涨落与分叉

代数的线性方程只有一个解,非线性的、即未知量的二次以上的方程通常都有多个解,例如二次代数方程就有两个解。对于研究动态系统的微分方程来说,情况也是一样,一般的线性动力学方程只有一个解,就是它的唯一的定态解,而非线性动力学方程通常都有几个定态解。在实际的系统自组织中,这意味着从无序到有序、从一种有序状态到另一种有序状态中,系统可能达到几种不同的模式、构型或结构。但可能性仅只是可能性,在现实的演化中,它只能达到某一种模式、构型或结构。因此,在演化过程中,从一种现实的状态进展到几种可能状态时,必定进展到某个关节点即分叉点,在

几种不同可能的稳态中加以“选择”,就像人们走路走到三岔路口或十字路口时必须做出选择一样。但是对于自组织系统来说,它到达哪一种稳定结构、哪一种结构将被“选择”是非确定的,事先是不可预测的。

我们仍以自组织的经典例子对这个分叉问题进行解释。在贝纳德对流元胞中,在容器的平面底上徐徐加热,开始时系统处于热力学的平衡态或近平衡态,它的液体分子并没有做宏观的对流运动;当温差升至某个临界点时,液体分子中会自发地但开始却是偶然地出现一些小的旋涡,小的卷筒(这就是我们后面要谈到的“涨落”),然后许多分子跟着这个卷筒走,从而形成宏观的对流结构。这个对流卷筒结构有两种可能的稳定结构,一种是顺时针旋转的(右旋),另一种是逆时针旋转的(左旋)。系统自组织过程经过某个分叉点要走向一种稳定结构,这是必然的,是由系统动力方程决定的。至于它走的是左旋的道路还是右旋的道路,即卷筒中某一区域的分子是全部向上流动还是全部向下流动,则是偶然的,它依赖于系统自组织过程中的某种涨落。而所谓涨落(fluctuation)是随机发生的若干组分之间的相关变动,它的出现没有确定的地点,没有确定的时间,也不能确定它的方向。贝纳德对流层卷筒在现实世界的例子之一就是由于地球表面的热量散发到高空,温差达到了一个分叉点,就出现了飓风、龙卷风。它有两种形式,一种是左旋的,一种是右旋的,而到底来的是左旋龙卷风还是右旋龙卷风,气象预报是绝对没法告诉我们的,谁也无法预告它,因为它是由所谓涨落决定的。

现在我们来考察布鲁塞尔器的分叉与涨落。我们仍令 A 保持不变,以 B 的浓度为控制参量,当不断增加 B 的浓度时,系统便越来越离开平衡态。当到达一定点时,系统便超出了稳定的阈值,进而到分叉点,就是图 9.8 中的 B 点,这时系统可能沿 L_1 , L_2 和 E 三条道路发展。 L_1 , L_2 是稳定态, E 是不稳定态。就稳定态来说,系统可能走上 L_1 , 也可能走上 L_2 , L_1 表示化学物质 x 在空间中的一种非均匀分布,例如它是 BZ 反应图中的左螺旋, L_2 表示另一种非均匀分布,例如 BZ 反应图中的右螺旋。对代表两种性质不同的耗散结构,系统到底选取 L_1 与 L_2 中的哪一个分布,完全是随机的、偶然的,宏观系统方程无法预言系统的哪一种结局。转向微观也无济于事,因为 L_1 与 L_2 是完全对称的。当我们反复进行实验时,系统越过分叉点,有一半系统走向 L_1 组态,另一半走向 L_2 组态,情况也十分类似于掷骰子。在某一次分叉转变中,选择 L_1 还是 L_2 是随机的、偶然的,是由外部的

扰动和内部的涨落引起的。

当然,以上所说的只是系统发展的第一级分叉,并没有将系统发展的全部可能性包括进去。而随着系统越来越离开平衡态,又会出现新的临界点和新的分叉。其情况如图 9.9 所示。

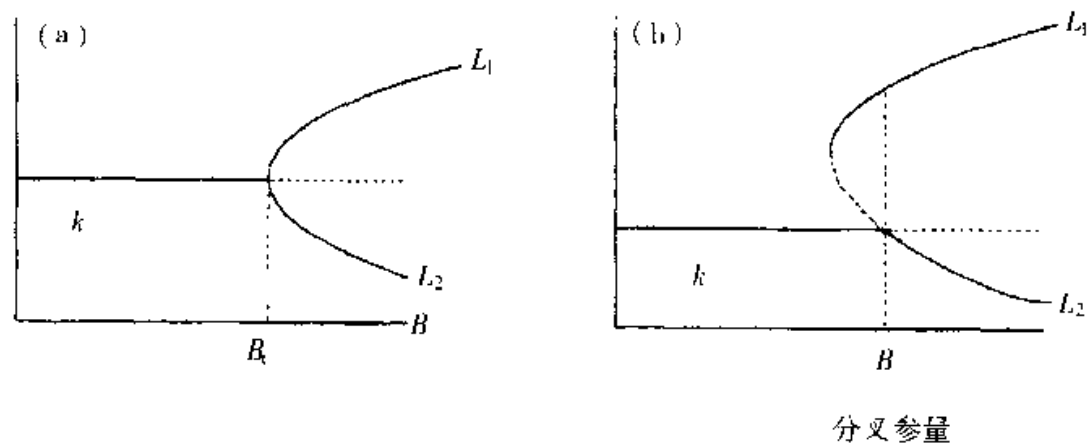


图 9.8 从热力学分支 K 到两个可能耗散结构 L_1, L_2 的分叉图

当控制参量 B 的浓度达到 B_c 时,系统不稳定发生分叉。图 9.8(a) 表明,对于偶临界波数,转变到两个新的解是连续的。图 9.8(b) 表明,对于奇临界波数,由 K 转变到 L_1 是跳跃的。

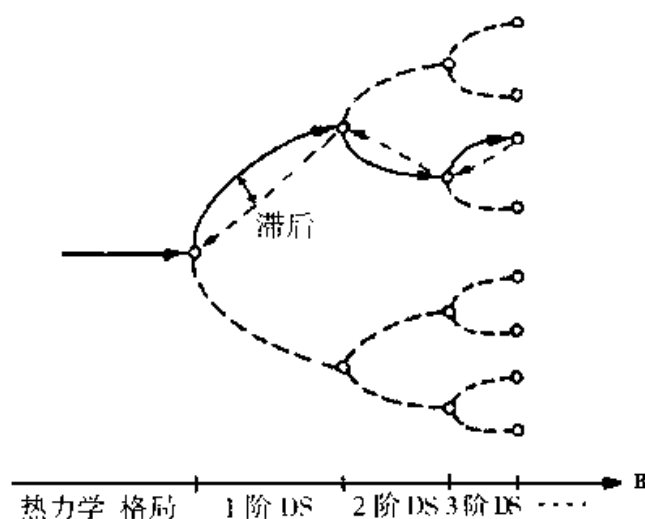


图 9.9 耗散结构进化中的宏观非决定性

在每一个不稳定阈中,有若干种(至少有二种)可能性进行选择。当不

平衡逐步减少时,结构按它所来自的同一途径退出,于是结构“记忆”了自己的初始条件。图9.9中,DS表示耗散结构。

以上所说,就是通过分叉、涨落而达到有序的自组织机制,这个机制给涨落以自组织的“诱因”或“触发器”的地位。涨落是系统的微观组分之间的相干运动,它是新的有序结构的胚芽。不同的涨落代表系统探索新的有序结构的不同趋势。但在分叉点之间,在系统存在着一个稳定结构或平衡结构的情况下,涨落通常很小,并且被结构的负反馈作用所抵消。但是,一旦控制参量逼近分叉点,情况便发生根本变化,这时系统开始失稳或失衡,小小涨落会迅速增长,涨落的相干尺度迅速增大,达到某种宏观的尺度,即所谓“巨涨落”,它就代表了一种新的有序结构;一旦被某种正反馈机制加以放大并稳定下来,它就成为一个新的占支配地位的有序结构。涨落不仅表示新的有序结构的胚芽,而且意味着偶然性在自组织过程中、在事物演化过程中起到关键作用。

所以普利高津说:在这里“如果我们考虑图9.8,且令控制参量有一个数量级为 λ_4 的值,我们就会看到,该系统已经含有很多可能会有稳定的和不稳定的行为。当控制参量增大时,系统将沿着‘历史’路径演变,这路径的特征是有一系列相继的稳定区域(这些区域由决定论的法则支配着)和不稳定区域(它们靠近分叉点,在那里系统可以在多于一种可能的未来之间做出‘选择’)。动力学方程的决定论特点(由这些可以计算出一组可能的态和各自的稳定性)和随机涨落(它们在分叉点附近的各态之间进行“选择”)难解难分地连接在一起。这个必然性和偶然性的混合组成了该系统的历史。”^①这里普利高津讲的“混合组成历史”,也可以理解为交替地支配历史。在分叉点之前,必然性和决定论起到支配的作用;在分叉点上,偶然性和非决定论通过涨落起支配作用;而在新的稳定分叉解被选择之后,决定论又取得支配地位。

在21世纪,世界到处出现各种分叉点。系统哲学家E.拉兹洛将它总结为三类社会分叉。^②(1)T分叉——由技术革新造成失稳后引起的分叉。

① 伊·普利高津、伊·斯唐热:《从混沌到有序》,曾庆宏、沈小峰译,上海译文出版社1987年版,第216页。

② E.拉兹洛:《进化——广义综合理论》,闵家胤译,社会科学文献出版社1988年版,第178—199页。

20 世纪技术上的突飞猛进造成了社会内部的不稳定,引起社会多极分叉。(2)C 分叉——由战争与冲突引起的社会动荡与分叉。许多国家的社会革命与政治危机由此而造成。(3)E 分叉——由经济危机和生态危机造成的分叉。20 世纪末出现的能源问题、食物问题和生态环境破坏问题,促使人类走上一个分叉路口。在这些分叉点上,涨落和偶然性起着极其重大的作用,存在着巨大的危机,也存在着巨大的机遇。当然,偶然性、机遇也不是不可控制的,我们自己的活动本身就是一种涨落。认识社会发展各个可能分叉的性质、自觉朝着对人类发展最为有利的社会发展方向前进的社会运动本身就可能是一种巨涨落,成为代表未来社会发展方向的力量。在社会发展的重新自组织的分叉点上,未来是不确定的,但是是可以争取人们期望的某种结果的。

▷▷ 9.3.2 协同作用

我们在 9.2 中讨论了非平衡开放系统中的非线性相干,已经谈到系统元素或系统变量之间怎样协调地相互作用,从而形成全局的序,不过那里重点讨论的是非线性,在 9.3.1 中,我们讨论在分叉点上某种元素之间的相互关系的涨落怎样通过正反馈的放大而形成宏观有序结构,不过那里我们重点讨论的是分叉与涨落在自组织中的作用。这样,到此为止,我们一直没有集中研究系统元素或变量之间的协同作用是怎样形成序的。在复杂系统科学史上,这个任务主要由德国物理学家哈肯创立的协同学(Synergetics)来加以解决。哈肯指出:“我把这个学科称为‘协同学’,一方面是由于我们所研究的对象是许多子系统的(通常是属于相同种类或几种不同种类的)联合作用以产生宏观尺度上的结构与功能,另一方面,这里又有许多不同学科进行合作来发现支配自组织系统的一般原理”。^① 这里所谓协同作用,指的是诸多子系统之间相互协调的、相互合作的或同步的联合作用。当然协同作用,广义地包含了竞争与合作,通过竞争达到合作,但重点强调的是合作,所以哈肯一再将协同学说成是‘协调合作之学’”,^②所以我们至少可以将

① H. 哈肯:《协同学引论》,徐锡申等译,北京原子能出版社 1984 年版,第 1 版序。

② 赫尔曼·哈肯:《协同学:大自然构成的奥秘》,凌复华译,上海译文出版社 1995 年版,第 6 页,第 8 页。

协同作用理解为竞争性的合作。

哈肯讨论协同作用的经典案例是激光的形成,即激光的自组织过程。因此,这里我们先介绍激光形成的过程。激光发展有很长的历史,它的原理早在1917年已被爱因斯坦研究光电效应时发现,但直到1958年激光器才被首次成功制造。哈肯为此建立了一套有关激光形成的自组织理论。

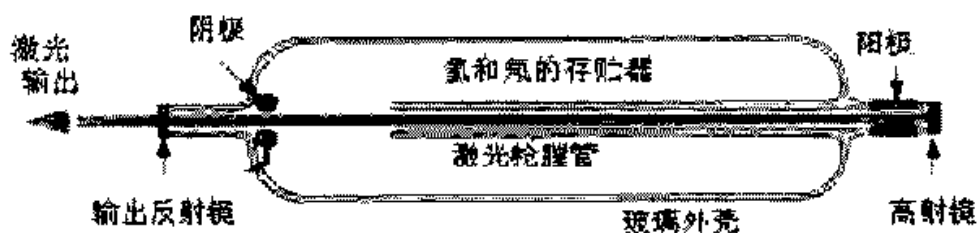


图 9.10 最简单的气体激光器

图 9.10 绘出了一个最简单的气体激光器,由充以氦和氖(比例为 5:1)的混合气体作为增益介质的玻璃光管组成,其长度约为 15cm 到 50cm 米不等,管的两端镶有两面反射镜子:右边的是高射镜,理论上是将 100% 的光线以平行方向反射回管中;左边的输出反射镜有 1% 的穿透率,激光由此而穿透出来,管中还设有一个内管,称为激光枪膛管,其能源(又称为泵源)装置由管外引入管内的一个阳极和一个阴极组成,外加电压为 1000V。本图输出的激光为 6321.8nm 波长的单色光,其功率由 1mw 到 100mw 不等。

根据原子物理学,原子的运动状态分为不同能级,当原子中电子从高能级跃迁到低能级时,它就会发出相应于能级差的光子(所谓自发辐射);一个原子中的电子从外界吸收一个光子时,会从低能级跃迁到高能级(所谓受激吸收),当它从高能级返回低能级时,同样放出光子。此时入射光子与释放光子有相同的波长和相位(这被称为受激辐射)。当激光器泵源的功率(或外加电压)比较小时,不同原子中的电子从低能级跃迁到高能级不是同步进行的,当它返回低能级时发射的光子是随机自发辐射的光子,其波长(或频率)、相位和偏振都是混乱无规的,总体上相互干扰,相互抵消,光场强度近似于零。这种情况就如同普通的日光灯所发出的光线一样,并无激光产生。但是当外加的电压或功率达到一定的阈值(激光阈),此时有较多电子跃迁到受激状态,它返回较低能级时放出的光子被两面反射镜来回反

射产生更多的受激辐射。一旦外加电压超过前面所说的那个阈值,大量原子吸收能量进入受激态,这个时间比较短,大约 10^{-7} 秒后就落入亚稳态的中间状态,在那里停留时间较长 ($> 10^{-3}$),于是停在亚稳态的原子数多于基态的原子数,出现所谓“粒子反转”。当它们返回基态时便发出波长、相位和偏振都高度一致的激光。首先,激光是协同相干的,都有相同的相位、相同的偏振,叠加起来产生很大的强度,即很大的光场;其次,它是单色的,在整个发生过程中,始终以一种特定波长占支配地位;再次,它的光束是很狭窄的,产生强大的威力,这就是无数原子之间在状态上的协同作用。也就是说,相对于自然光而言,它是一种高度有序的状态。特别值得注意的是,这种高度有序的状态并非由外界条件直接决定。外加电压(泵源)只能确定激光出现与否,而不能决定其具体的状态(频率、相位等),这种状态都是通过 9.4.1 所说的随机涨落和选择的正反馈作用而确定下来的。哈肯说:“事实上,激光开始发射时,其中的波完全不同,它们是几个‘冒失’的光电子所放射出来的。这些波相互竞争,以求从其他受激光电子得到加强。这些电子通常是把自己的能量交给与光电子固有‘节律’最为接近的一种波。虽然这种特定的波常常只占很微弱的优势,但它将以排山倒海之势得到加强,最终压倒所有其他的波。一旦这种波建立了它的主导地位,它常将支配一个原子的每一个新受激的电子,并使光电子按它的周期共振,起到序参量的作用”^①。

关于激光的形成,以及刚才所说的“序参量”,可从宏观角度建立一个系统的演化方程来加以分析。方程如下:

$$\frac{dI}{dt} = (D - Ac)I - \beta I^2$$

其中: I 表示光强,它是一个随时间变化的量,在这里作为描述系统演化的序参量; D 表示增益系数,表示增益介质受激辐射的能力,受激辐射会增加光强; DI 表示受激辐射的强度,它与入射光的强度成正比; Ac 表示损耗系数,表示受激跃迁的能力,受激跃迁要吸收光子,使光强减少; AcI 表示受激跃迁的强度,它与入射光的强度也成正比; β 表示饱和系数, βI^2 表示对

① 赫尔曼·哈肯:《协同学:大自然构成的奥秘》,凌复华译,上海译文出版社 1995 年版,第 56—57 页。

光强增加的限制,它与光强之间呈非线性关系(因为激发态上的粒子数是有限的,所以当光强 I 较大时,许多光子不再有机会导致受激辐射,也即光强不可能无限增加,而当光强较小时,这种限制不明显)。

如果令 $\frac{dI}{dt} = 0$, 可得方程的定态解: $I_1 = 0, I_2 = \frac{D - Ac}{\beta}$ 。

现分别给 I_1, I_2 一个很小的扰动 ΔI , 并对其进行稳定性的分析。

结果表明:当 $D < Ac$ 时, I_1 是稳定解($t \rightarrow \infty, \Delta I \rightarrow 0$), 而 I_2 为负值没有意义;当 $D > Ac$ 时, I_1 不是稳定解($t \rightarrow \infty, \Delta I \rightarrow 0$), I_2 为正值, 有意义, 且是稳定解($t \rightarrow \infty, \Delta I \rightarrow 0$)。

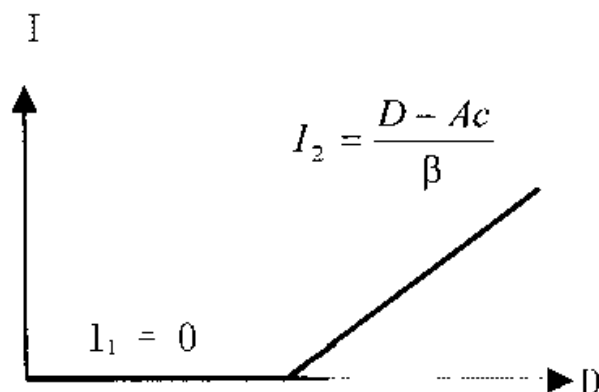


图 9.11 方程分支解

可见, $D = Ac$ 是临界点。当 $D > Ac$ 时, 系统离开热力学分支($I_1 = 0$, 对应于自然光)而自发地演化到耗散结构分支($I_2 = \frac{D - Ac}{\beta}$, 对应于激光)上去了。

讲到这里, 我们已经详细分析了自组织理论的经典的案例: 贝纳德滚卷筒、BZ 反应, 以及这里的激光形成, 它们之间有一个共同的特点, 就是系统大量的微观组分相关联地协同作用。用哈肯的话来说: “各个部分像由一只看不见的手在驱动排列; 另一方面, 正是这些个别系统通过其协同作用, 又反过来创造了这只看不见的手, 我们把这只能安排一切的看不见的手称为‘序参量’。”^① 具体来说, 序参量是为了描述系统整体行为而引进的宏观参量, 是系统有序程度的一种量度。(另一种量度是本章开始时讨论的负

① H. 哈肯:《协同学》, 凌复华译, 上海译文出版社 1995 年版, 第 8 页。

熵。至于哪一种度量更加优越,学界并无定论。)比如,BZ 反应中的组分浓度,铁磁相变中的磁化强度,贝纳德花样中的对流运动,激光系统中的光场强度,生态系统中种群的个体数等,都可以看成是系统的序参量。自组织的过程也就是序参量产生的过程。在自组织前,系统的序参量为零,系统大量的微观组分处于无序均匀状态,或各行其是,杂乱无章,不可能产生整体的序。自组织开始后情况就不同了,一方面,子系统的合作产生了序参量,这在哲学上叫做从微观对宏观的上向因果关系;另一方面,序参量又支配子系统的行为,这叫做支配原理或役使原理,在哲学上叫做从宏观到微观的下向因果关系。两者互为条件,从而使系统的宏观性质发生了改变。更重要的是,这种序参量的产生并不是外部约束或加于系统的,而是自发的。哈肯曾通俗地解释到:“我们设想一个游泳者在游泳池内来回游,夏天池内拥挤,人来人往,彼此受阻。……游泳者会想到旋游这个念头上来。开始也许只是少数人这样游,但不断有人加入,因为旋游对大家更方便。这种没有外来指示的共同行为是自组织的,自然界以同样的方式行事。以液体为例,它‘发现’,如果它们能一起进行有规律的运动,向上传输热的部分更容易得多……液体发现热的部分上升特别有利,于是这种方式就不断增长……一种运动方式逐渐占支配地位,把其他方式压了下去,液体出现一种完全特定的卷筒运动,这种卷筒运动起着序参量的作用,引导各部分液体的运动方式。一旦这种方式在液体的部分领域形成,其他部分也将被吸引过来,也就是说,它们被序参量所支配。”^①

关于自组织中协同与合作的作用,我们只是对非生命世界中的情形做较简略的讨论。关于生命世界以及人类社会的复杂系统自组织中竞争性的合作如何起作用,这个问题将在本章第4节中进行较详细的讨论。

▷▷ 9.3.3 分布式控制与鲁棒性

通常人们会认为,一个有高度组织性的系统一定是一个具有集中性控制的系统:生命由它的DNA蓝图来控制,动物由它的各级神经系统来集中控制,人类行为由他们的大脑来统一控制。就像我们在上一章所讨论的那样,有11个层级的集中控制。一个社会、一个国家总有一个政府首脑,对政

① H. 哈肯:《协同学》,凌复华译,上海译文出版社1995年版,第36—37页。

府部门进行领导。这些控制者,虽然是这个组织系统的一个组成部分,但在组成、结构与功能上是可以与系统的其他部分、与系统的被控制部分区分开来、成为独立的子系统。这样的系统,我们称之为集中性控制系统,这种控制称为集中性控制或集中化控制(Centralized Control)。

但事实情况并不是这样,在典型的自组织系统中,它的控制不是集中性的,而是分布式的。所谓分布式控制(Distributed Control)或分散式控制(Decentralized Control),是从神经网络的研究中发展起来的一种非线性的控制方式。简单地说,就是它的控制功能的实现不是由一个控制者子系统来执行,而是分散地由系统的各个组成部分协同地按一定概率分布发出控制信号来加以实现。例如,上面所说的贝纳德滚筒层流的形成就不是由某个控制者来实现这种相对稳定的宏观模式的,而是由所有的液体分子的局域性的协同作用来加以制约、控制的。所有的分子都分担了控制的“责任”。蜜蜂建造蜂房,蚂蚁筑成蚁丘,并不是由蜂皇或蚁后发号施令或发出信息集中控制蜜蜂或蚂蚁进行的,而是每只参与其事的蜜蜂、蚂蚁各自依照其相对简单的行动规则分散地对这个整体行为加以控制的,因而叫做分布式的控制。如果说这里存在“控制者”,则人人都是控制者,自然也就没有独立分离的控制者子系统了,因而在这个意义上是分布式控制。同样,在一个由为数众多的独立生产者和独立消费者组成的自由而非垄断的市场里,某种产品的价格并不是集中控制的,也是不可能集中控制的。它是由每一个生产者或消费者分散控制的,虽然每个当事人都未必意识到他们有份控制商品价格,因为它是自然形成的。它不是集中控制,一旦由政府强制实行某个价格,或者有垄断集团施垄断力量抬高价格或压低价格,那就不是自由市场了。

这不是上小节所说的各组成部分的协同作用吗?怎么可以称之为分布式“控制”呢?这是因为,这种局部对整体的作用,是完全符合本书第4章的控制定义的。根据控制论创始人 W. 艾什比的控制论思想,所谓控制就是对系统的可能状态的约束,使它缩减到特定状态 q^* 的过程,即 $C(q_i) \rightarrow q^*$ 的变换过程。自组织过程就是一个自发地产生约束、由多数的可能状态落入某个少数的稳定的“吸引子”状态的过程。在这个缩小多样性的意义上,它显然是一个控制过程,同时根据上节对自组织的非线性分析,当系统组成部分的状态经正反馈协同达到一个稳定的模式后,负反馈便起到主导

的作用,对于环境出现对系统稳定状态 q 的干扰 $D(q)$,总存在着一种作用 R ,使 $R(q)$ 抵消 $D(q)$,即 $R(q) = -D(q)$ 。一个生态系统受到局部的环境干扰,例如森林火灾,它总存在一种修复力使烧掉了的部分重新恢复过来,“野火烧不尽,春风吹又生”,这就是一个对环境干扰的抵消意义上的自动控制,它也是分布式控制。

在分布式的组织和控制中,由于它未分化为各种专门的不可替代的组成部分,所以当某个部分受到破坏时,其他组成部分可以替代它的功能。大脑的神经网络本身,就没有某种神经元可以控制一切,对于事故、手术或其他病变引起的损伤,其功能可以由其他部分所替代,就是一个明显的例子。分布式自组织系统中,随机的涨落或“噪音”,只要范围适当,就不但不会妨碍自组织,而且能成为自组织的诱因和动力。在这两方面的意义上说,自组织系统具有它的鲁棒性,即强健性和坚韧性。

▷▷ 9.3.4 自组织与他组织,中央控制与分散控制

我们已经讨论了自组织和自组织系统的基本概念,那是在最纯粹的形式上主要使用前生命时期即非生物的例子来加以讨论的。不过,自组织是相对于他组织而言的。所谓自组织,我们在本章中已经讨论过,是序在网络中形成的过程,是在既没有外界环境有序结构的信息、也没有内部控制者提供指令的情况下自己自发产生和自己分散控制下实现的。相反,所谓他组织(又称为被组织)是系统中有序结构的这样一种形成过程:它是在外界环境施加决定性影响(特别是施加特定组织程序的影响)的情况下或由一个分离的子系统即控制者系统施加组织指令的作用下形成的,后者是一个集中控制或中央控制的过程。在现实的复杂系统中,常常既包括自组织的过程,又包括他组织的过程;既包括自组织的分散控制的领域又包括他组织的集中控制的领域。因此,上章所研究的多层级的(集中)控制系统与本章所研究的自组织系统是相辅相成的。

首先,我们来看具有中央控制的系统,例如具有高级神经系统的动物。它的中央控制系统有一个起源问题,如果一级一级沿着进化的阶梯向下追索,最初的中央控制系统是通过分布式控制的自组织过程而形成的(参看本书 4.5.5),而最初的生物是没有神经细胞这些控制者来加以控制的。在经过自组织形成神经细胞后,中枢神经系统这个高层次的控制者的形成,在

相当大的程度上也是一个自组织的过程。因此元系统跃迁本身需要一个自组织的解释。再来看看高级神经系统往后的发展,我们知道就是人脑的形成。我们身体中的行为是由大脑来加以集中控制的,大脑通过神经系统控制我们的肌肉运动。可是大脑又由什么来进行集中控制呢?我们可以说是心灵(mind)对大脑进行集中控制,可是心灵又由什么控制呢?如果一直追问下去,就会导致“心灵的心灵”(mind within the mind)或脑妖(little-man-in-the-head)这样一个悖论。下图就表现了这个悖论。

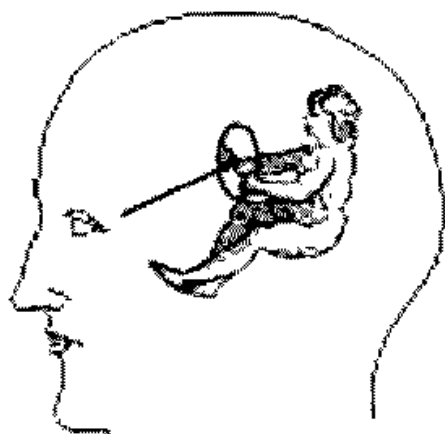


图9.12 脑 妖

为了避免无穷倒退,我们惟一的出路就是在某个最高控制层级上揭示其中的自组织机制。

如果我们来考察一个经济系统的集中控制。显然对经济系统需要进行宏观调控,这是一个由政府实现的集中控制问题。没有这种调控,不能解决公共事业(所谓公共产品)的兴建问题、环境的保护问题、避免经济危机问题以及缩小贫富差别和实行社会公正等问题。但是这种集中式的控制,这种对企业和市场的他组织,是要建立在市场经济的自组织的基础上的,否则就不可能有足够的资源让政府进行宏观的调控。而宏观调控的某项政策与法规的最后决定,总不能由一个人说了算,总得由某个委员会加以解决。当出现意见分歧不能协商一致或者各利益集团相互角力不能平衡时,最后某个委员会还是要通过投票来解决。这个投票控制就是一种分布式的控制。

其次,我们再从自组织的局限性来看自组织与他组织、集中控制与分布

控制的关系。纯粹的自组织,即没有集中控制者的系统的自组织,只能在非生命世界中发现。生命的起源首先在于形成 DNA,它就是一个分离的控制者系统,它成为生命系统的组织者和控制者。生命的进一步发展有赖于它的内部控制者和组织者的发展,以及它们与被组织者之间的相互作用。集中控制与分布式控制相比,有它的劣势,也有它的优势。分布式控制的优势已在 9.4.3 讨论了,就是它的鲁棒性,即它的强健性、坚韧性和自主性。集中控制的优越性在于:(1)它能独立于被控者系统而变化、发展,即它可以通过适应与学习改进它的功能而不直接干扰与妨碍被控系统,因此当环境发生重大的变化时,具有集中控制的系统由于具有适应、自学习的功能,便可以平稳地过渡到新的系统和新的组织。而没有集中控制的自组织系统,只能从一种吸引子状态跳跃到另一种吸引子,这意味着系统在动力学上的改变,即重新进行自组织过程,带有某种“推倒重来”的破坏性;(2)集中控制系统由于具有适应与学习的功能,因而可以起到艾什比(W. R. Ashby, 1970)所说的对环境进行建模的作用和坎贝尔(D. T. Campbell, 1974)所说的代理选择器(Vicarious selectors)的作用。这就是说它可以预言环境的变化在环境破坏系统之前改变和消除系统的不适应环境的行为。这只有在系统组织过程中存在着一个分离的控制者系统时才能做到,而控制者系统之所以能做到这一点,还因为控制者储存了足够的信息,而储存信息的控制者系统受到被控制系统的保护。例如,DNA 的遗传信息受到细胞壁的保护,人的大脑受到坚硬的头骨的保护。有关这种适应性问题,将在下一章进行讨论。

因此,当我们讨论复杂系统时,自组织问题并不只是一般组成元素的自组织问题,而且是行动主体的自组织问题。这里所谓行动主体,就是具有自己的目标,能独立接收、储存和处理环境信息并据此作用于环境以达到自己目标的主体,这样的主体显然有许多种类,如自主行动主体,适应性行动主体,智能主体,经济行动主体,管理行动主体等等,但它们(至少是它们的大多数)都显然是具有某种独立中央控制系统的。复杂系统的自组织理论主要就是研究这些行动主体之间怎样自主地进行相互作用而形成高层次的自组织系统。有关这个问题,我们将在下一节进行讨论。

►► 9.4 自主行动主体之间的自组织

在本节中,我们要讨论复杂系统的自组织的模拟问题。这里所谓复杂系统,主要指的是由自主行动主体组成的系统。因此,有必要首先搞清楚自主行动主体的概念。

▷▷ 9.4.1 自主行动者的概念

Agents 的概念,有时译成行动者,有时译成主体。根据这个概念的科学含义,我们将它译成行动主体,即自主的行动者。在行动主体之前加上一个定语叫做自主行动主体,是想要说清它的最主要特征。在明白了这一点之后,我们将自主行动主体、自主行动者与行动主体作同义语使用。

自主行动者一词是从计算机科学与人工智能学科借用过来讨论更为普遍的复杂系统(包括人工系统和自然系统二者)的规律与特征的。要给它下一个定义来概括所有自主行动者的共同或本质特征是很困难的,这在哲学上叫做本质主义的困境。不过概括它们的典型特征仍然是可能的。下面的一个定义是 1995 年世界上有 200 间大学和学院使用的一本《人工智能:现代观点》的教材给自主行动者下的定义:

“一个行动主体是所有那些能被看成是通过感受器来感知它的环境并通过效应器来作用于这个环境的一切事物”。^① 这就是说行动主体必须通过对环境的认知和行动来改变环境。

麻省理工学院米底亚实验室帕迪斯·梅丝(Pattie Maes)教授是行动主体研究的开创者和倡导者,她给行动主体补上了两个最根本的特征。她说:“自主行动主体是一个计算机系统,它位于某种复杂的动力学环境中,在这环境里自主地感知和行动,并且在这样做时实现了一组目标或任务。”^②

有了这两个相互补充的定义,我们对自主行动主体或自主行动者的概

① Russell, Stuart J. and Peter Norvig (1995). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, p. 33.

② Maes, Pattie (1990) ed. *Designing Autonomous Agents*. Cambridge, MA: MIT Press, p. 21.

念的理解就比较清楚了。一个人是不是一个自主行动者？是！（他或她）是按照自己的目的独立自主行动的。一个动物，例如一只蚂蚁、一只飞鸟、一个蚊子、一个原始细胞都是自主行动者。人的一只手、一只脚是不是自主行动者呢？不是！因为它完全接受大脑的命令，行动没有自主性。你的房子里的乱七八糟的物品也不能被称为自主行动者，虽然它们是某种系统的一些元素、物质客体。你的计算机的键盘以及输入文字的程序也不是一个自主的行动主体，不过如果你电脑中有个自动为你修改你的错字的程序，那个程序就可算是自主行动主体了。至少机器人一般都将它看做是行动主体。这样看来，自主行动主体至少有四个基本的或典型的特征：

1. 自主性 (autonomous)：自主行动主体独立进行运作，不受其他行动主体或人的命令或直接干预，并有某种控制自己行动和内部状态的机制。

2. 反应性 (reactive)：能对环境进行及时的应答变化，感知环境和作用于环境。

3. 目的定向性 (goal-oriented)：它并不是简单地消极地对环境作出反应，而是能展示出一种主动的有目的性的行为，在环境中实现自己的目标。

4. 历时连续性 (temporally continuous)：以上这些特性和行动是在一个时期里持续地进行的，即持续地实行自己的程序。

在本节中，我们将通过计算机模拟探索动物世界的两个例子——蚂蚁与鸟群，看看那些自主自在、各行其是的行动主体怎样可能通过自组织实现考夫曼所说的“自由序” (order for free) 的形成，像是事先有个总体计划来形成一个系统似的。本节的另一个目的在于说明，即使我们完全了解那些只遵循极其简单的行为规则的自主行动者，一般也不可能预测和推断出它未来所组成的系统的整体行为，这种突现的性质也是自主行动者的自组织的一个根本性质。

▷▷ 9.4.2 蚂蚁行为的模拟

单个蚂蚁的行为是很简单的，生物学家指出它只有十几种行为规则，如遇到食物时散播出某种气味（外激素分子）、其他蚂蚁按这气味激素行动等等，可是蚁群的系统行为都是十分复杂而有序：行走最短的距离到达食物所在地，在非洲平地上筑起几米高的蚁巢，最合理地使用建筑材料，最大限度

地繁殖自己的物种,以至于在野生动物中,它的总量占了 $\frac{1}{3}$ 等等。这种突出现象怎么可能呢? 克里斯·朗顿(Chris Langton)运用元胞自动机来模拟蚂蚁行为。这种模拟蚂蚁又称为虚拟蚂蚁(Virtual ants)或叫做 Vants。^① Vants 是Langton 发明的一个新字,过去的字典上是没有的。它处的环境是:

1. 有限无界棋盘方格子,像我们上章所讲的“生命游戏”的元胞格子那样。

2. 各个格子的颜色可以是白的,也可以是黑的。

3. 每只模拟蚂蚁面临可以走的东、西、南、北四个邻格。

行为规则是:

1. 蚂蚁向前运动着。

2. 当蚂蚁进入白元胞时,左转 90° 并将该元胞涂成黑色。

3. 当蚂蚁进入黑元胞时,右转 90° 并将该元胞涂成白色。

这几条规则可能是受到蚂蚁留下的激源导引和改变其他蚂蚁的行动的启示而创立的。

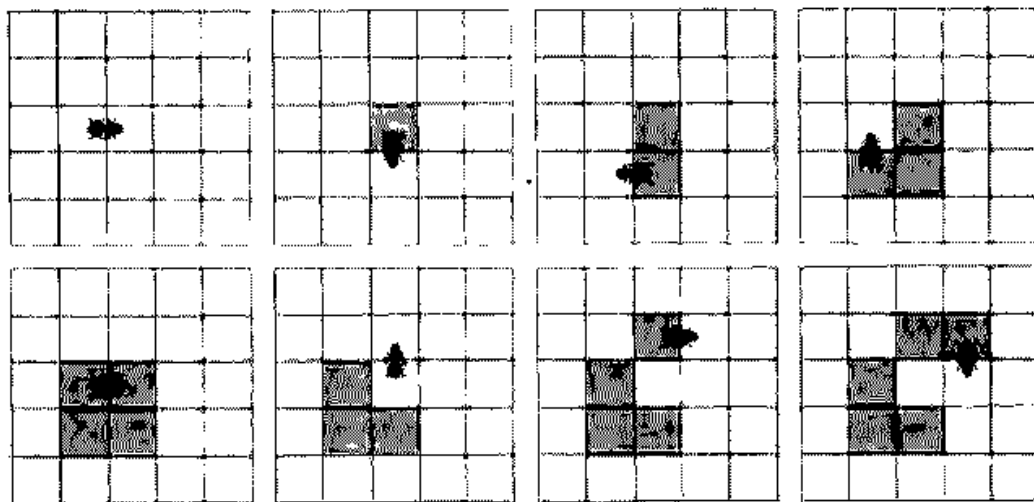


图 9.13 模拟蚂蚁在元胞格子中从初始空格开始走了八步

图 9.13 说明了单个蚂蚁的行为规则是何等简单,并且这种运动在时间上又是可逆的(图 9.13 第 8 步图可以逆返回第 1 步图),所以个体自主行动

① I. Stewart, "The ultimate in anty-particle". *Scientific American*, July 1994, pp. 88-91.

者在行为规则上和时空结构上都是简单的。但一旦单只蚂蚁与自己过去的行为留下的影响发生相互作用,总体的简单性就被彻底打破了。假设单个蚂蚁从完全白色的空间网络出发,走了 500 个时步,便实质上返回原位,这时由于蚂蚁的行动与自己过去行动留下来的(使空间格子变黑变白的)影响发生相互作用,很快便进入一个混沌状态,其行为是不可预测的。假设我们在初始条件上改变一点点,例如在某处去掉一个黑格,整个行为以后会发生戏剧性的变化,刚才说到的不可预测性就与这种对初始条件的极度敏感性有关。但是如果我们在图 9.13 上继续模拟 10000 个时步之后,蚂蚁突然表现出极其规则和有序的行为,它逃出了“混沌初开”的阶段,开始了詹姆斯·普罗普(James Propp)所说的修筑高速公路。^①詹姆斯·普罗普首次发现了这种高速公路与网格空间成 45° 角,可以有四个方向。图 9.14 就是从初始条件为所有元胞都是白色、并将蚂蚁放在中间位一万多时步后突然开出的高速公路。如果网格空间为无限大,则蚂蚁会沿高速公路走向无限远;而由于我们的元胞空间是“有限无界”的爱因斯坦宇宙,元胞空间四边卷起,高速公路终将与蚂蚁曾活动过的格子空间相交,这又迫使蚂蚁返回混沌状态;但它在混沌区停留若干时间后,又会自发地开辟另一条高速公路。

关于这个问题,乔巴德(B. Chopard)与迪奥兹(M. Deoz)在 1998 年出版的一本书中说了一段很有哲理性的话。他们说:“朗顿蚂蚁是元胞自动机的另一例子。朗顿蚂蚁元胞自动机的规则虽然极简单,却能产生出超乎想像的复杂行为。不知何故,这实乃典型的元胞自动机方法:虽然我们知道所有有关控制系统的基本法则(因为是我们自己制订的规则),但往往不能解释其宏观行为。与平常的科学方法不同的是:一般地,物理学家只理解(通过试验)系统的总体性质,根据这些性质,试图寻找出普遍法则。元胞自动机例子表明,从哲学的观点看,基本法则是非常重要的,但并不完备,物理过程的完整知识需要微观和宏观水平的认识”。^②这就是说,还原论是不够的,需要用突现论来补充。突现性质是复杂系统中自主行动者自组织的一个根本特征之一。

① J. Propp, "Trajectory of generalized ants". *Math. Intelligencer*, 16(1); pp. 37-42. 1994.

② 乔巴德、迪奥兹(B. Chopard, M. Deoz, 1998):《物理系统元胞自动机模拟》,祝玉学、赵学龙译,清华大学出版社 2003 年版,第 35 页。

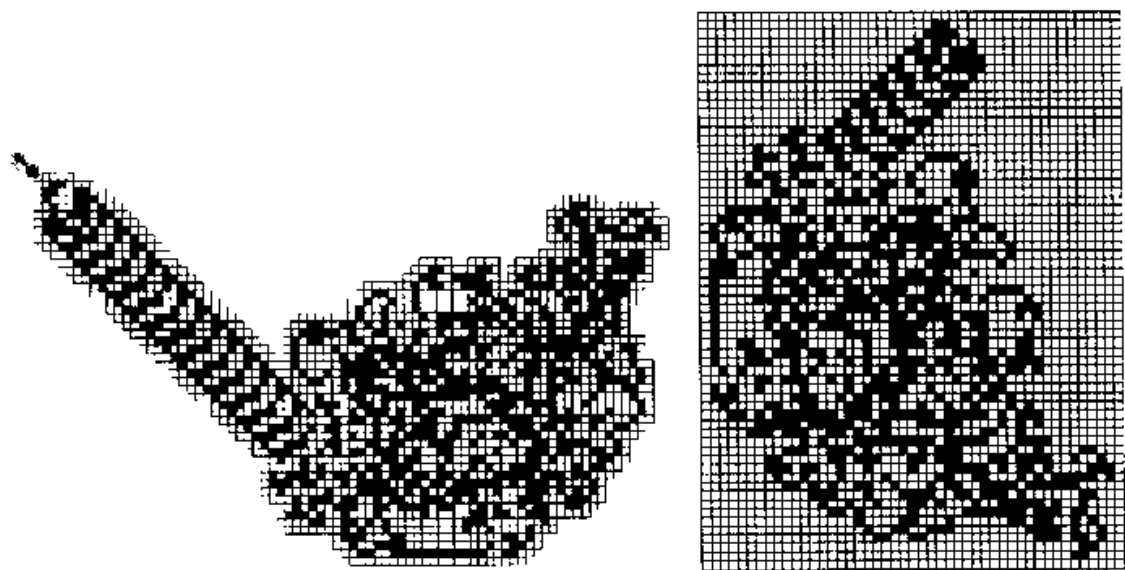


图 9.14 模拟蚂蚁修筑高速公路

当有几只蚂蚁同时在元胞网格中行动时,我们可以看到它们在建筑高速公路上的相互协同和相互干涉的行为:(1)两只蚂蚁在建筑高速公路上有更加复杂的建构行为。当它们相遇后,会出现建构高速公路的停顿、建造、再停顿、再建造的周期行为。而几只蚂蚁无规的运动有利于颜色(白或黑)的有规则排列的出现,从而使建造第一条高速公路前的准备时间比单个蚂蚁在建筑高速公路时的准备时间(1万多个时步)短得多。(图 9.15 显示,几只蚂蚁在空白的元胞中随机起步,只需 1000 多时步就开始建筑高速公路。)(2)一旦公路建成,其他蚂蚁就可利用这条高速公路快速前进,而不必仿效其建设者来回兜圈子的走动、退一步进两步那样的扭秧歌式的行进。可见,“高速公路”这个词是用得比较恰当的。就像现实的蚂蚁利用别的蚂蚁的放出激素的道路行走得更快更直一样。(3)当有别的蚂蚁插入原有高速公路的建设时,常有破坏性的后果,使蚂蚁们进入新的混沌运动,或者使公路沿其他方向迁移。图 9.15 显示了这种情况。^①

自从朗顿发明了模拟蚂蚁之后,许多其他研究者通过改变蚂蚁的行为规则或非空的初始条件发明了许多其他形式的蚂蚁,某些科学家对模拟蚂蚁的一般形式做了研究,又得出了一些非常有哲理的结论。弗莱克(G. W.

^① B. Chopard, M. Deoz (1998):《物理系统元胞自动机模拟》,祝玉学、赵学龙译,清华大学出版社 2003 年版,第 36 页。

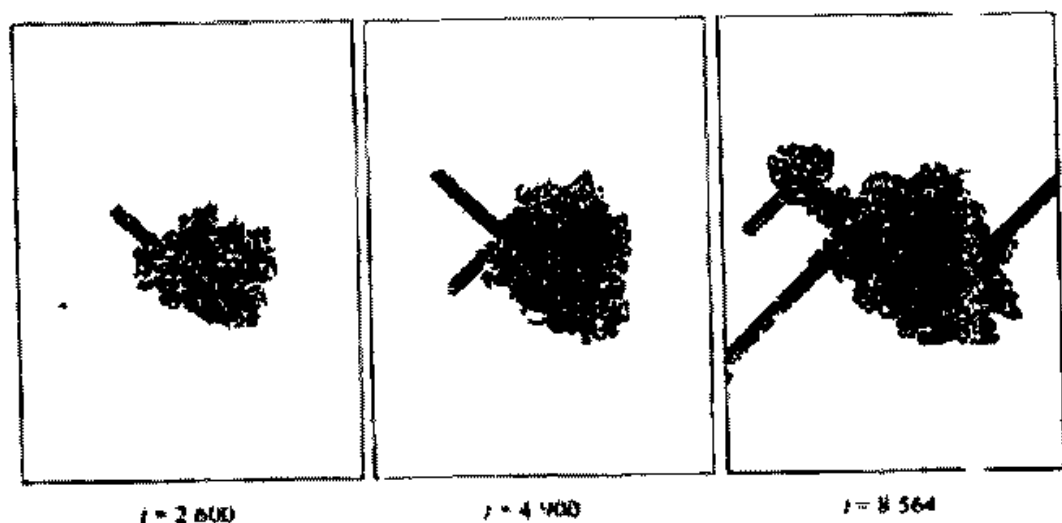


图 9.15 几个朗顿蚂蚁的运动

Flake) 在他的那本被当做复杂系统导论教材的著作《自然的计算美》一书中写道:“建设高速公路,作为虚拟蚂蚁的性质,可以在除了朗顿蚂蚁之外的其他类型的蚂蚁中被发现。某些一般化的虚拟蚂蚁实例在经过几十万步的混沌行为之后,突然自发地转入建筑高速公路的行为。对于其他的实例,即使这些蚂蚁混沌地走了几千亿步,也没有谁知道它是否走上建筑高速公路的地步。”

他继续说,“伊安·斯图瓦尔特(Ian Stewart, 1994) 做了一个有趣的观察。他认为,我们根本就缺乏对这些虚拟蚂蚁的长期行为的知识,对于任何这些蚂蚁,我们知道它们的所有理论,支配这些蚂蚁宇宙的‘物理’规律是简单的,并已为我们所知,我们也知道这个蚂蚁宇宙的初始构型(initial configuration)。但我们仍然没有希望能回答这样的问题:这些蚂蚁会建筑高速公路吗? 将所有这些问题放进我们的视角里,如果物理学家甚至已经发现了有关我们宇宙的所有事物的理论,并且我们已经推出这个宇宙的初始状态,我们仍然无望能导出我们宇宙的长期行为。因而,正如斯图瓦尔特所说的,在这种情况下有关所有事物的理论预言了所有的事物,但不能解释它。”^①这一段话,同时说明了复杂系统自组织过程的突现性。

① G. Flake, *The Computational Beauty of Nature*. A. Bradford Book, The MIT Press, 2001. p. 270.

▷▷ 9.4.3 羊群、兽群与鸟群

如果你观察过动物群体的行为,鱼群在水中,飞鸟在空中,走兽在陆上,它们的集体行动显示了整体的最优化和行为的多样性,仿佛是一头巨大的怪兽在行动。它们完全没有一个集体的脑,没有一个统一的计划与指挥,却好像战场上有个英明的统帅和专业的智囊,统一筹划打出一场大获全胜的战斗一样。这怎么可能呢?这就是自然界、特别是生命世界中的自组织的力量。

1986年,计算机科学家、进化计算研究者克莱格·雷诺尔德(Craig Reynolds)建立了一个计算机模型来研究它的机制。他从独立的、遵循一组简单规则行动的自主行动者开始研究,给动物群体中的自主个体起了一个名字叫做 Boids。这又是字典上没有的词儿。它代表每一个 flockmates。这两个词最好都译成“群伴”,群体中的同伴的意思。Boids 是群伴的模拟, flockmates 是现实中的群伴。

在群体行动中,群伴的目标与行为规则异常简单:

1. 防撞(avoidance):诸群伴在共同飞行中保持一定的距离,避免因拥挤而相互撞倒。
2. 模仿(copy):为了列队飞行,群伴模仿着它附近的同伴的平均速度与方向飞行。
3. 聚中(center):尽可能向群体中心运动,结果是群体外部暴露最小。
4. 视野(view):从妨碍视野的群伴中移开一点,以便尽可能看到其他群体。

以上四条规则可用图 9.16 来表示:



图 9.16 群伴行为的四项原则

在以上的四项原则中,防撞是最根本的,因模仿其他鸟的速度矢量而飞行也可达到防撞的目的;至于聚中,对每个群伴来说,则是一条自私原则。因为一个群体在移动中总是面临它们的天敌的袭击。外圈的群伴最易受袭击,居中者成为掠食者的肉的机会总是少得多。进化论进化出这条规则似乎是必然的。视野原则是其他原则的保证。因为如果群伴不移开一定距离,就会有其他群伴阻碍它的视线。雁南飞,飞成人字形,这是因为其群伴只要从它的飞行速度方向垂直移动一点点,就足以看到领头雁和其他的雁。

这四项原则之间彼此是有一定矛盾的,如果某个群伴硬要往中间走,就会撞倒其他群伴,两败俱伤,结果更有可能成为掠食者口中的肉。因此,从数学上应该给出四项原则所分别决定的每个群伴飞行(或奔走,奔游)的速度矢量以一个权重。将它们加权平均,导出群伴新的速度矢量 V_{new} 的一个公式:

$$V_{new} = (\mu V_{old} + (1 - \mu)(W_1 V_1 + W_2 V_2 + W_3 V_3 + W_4 V_4))$$

这里 V 表示速度, W 表示权重因子,其下标 1,2,3,4 分别代表上述自主行动者的四原则,1 表示防撞,2 表示模仿,3 表示聚中,4 表示视野等等。 μ 是动量词,将新合成速度矢量加到老的位置上,便得到新位置

$$P_{new} = P_{old} + TV_{new}$$

P 为位置矢量, T 表示时步大小即时间增加, TV 就是一个位置的增量。

一般说来,权重的大小序列应该是:

$$W_1 > W_3 > W_2 > W_4$$

图 9.17、9.18 以及 9.19 展示出坚持四项简单原则的行动主体会通过合作与竞争自发地展示出复杂的高层次结构与行为。在图 9.17 中,我们看到无组织的群伴聚合为一个单一的自组织群体。这里因聚中效应和视野效应,无组织群体最初结成一大一小的群体,最后集合为一。图 9.18 表明,当我们给聚中和防撞以较大的权重时,无组织群伴很快形成两个群集结构。终于,小群集变得不稳定,最后,其中的群伴离开它,走向组织更大的总体群体。图 9.19 则说明了视野原则造成的人字形的飞行。

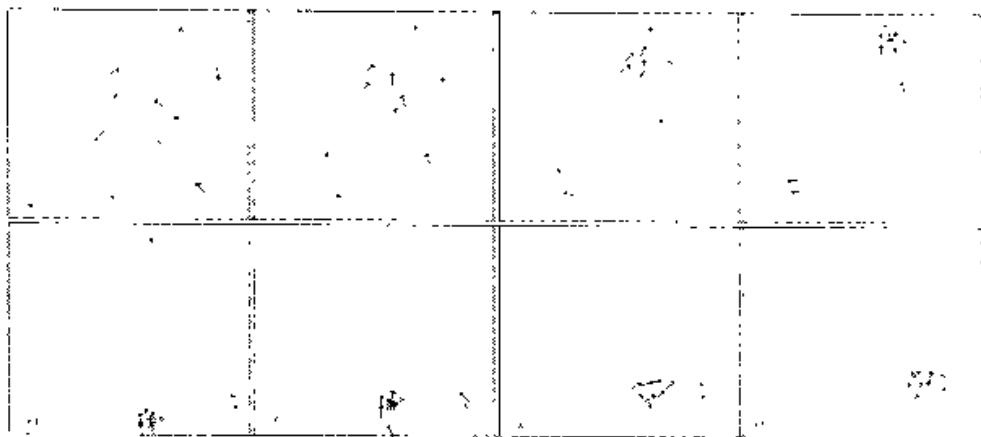


图 9.17 无组织的群伴聚合为一个单一的自组织群体

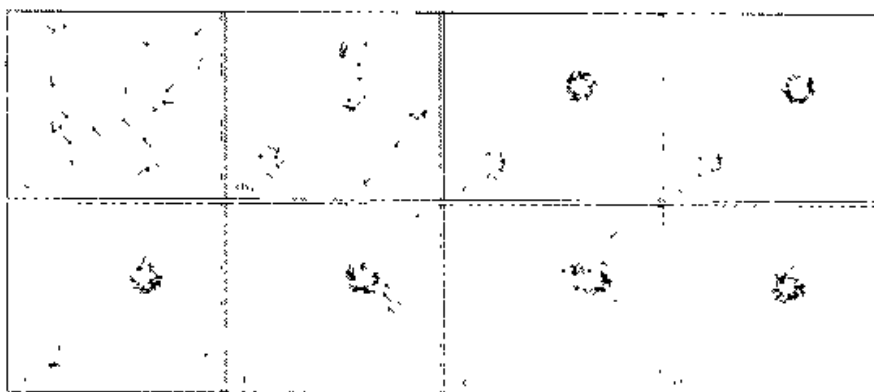


图 9.18 给聚中和防撞以较大的权重，无组织群伴很快形成两个群集结构。小群集变得不稳定，最后走向组织更大的总体群集

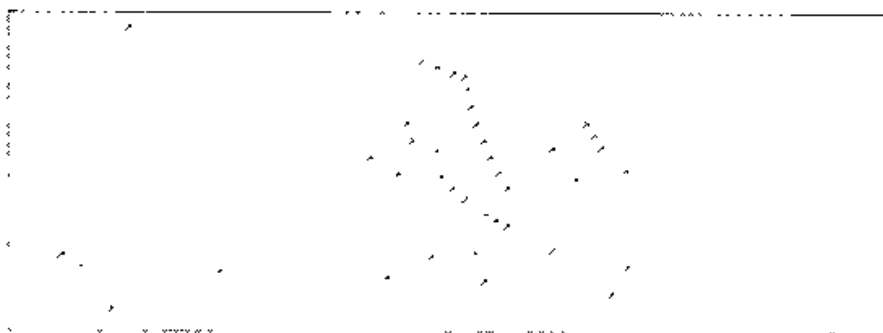


图 9.19 视野原则造成的人字形的飞行

第 10 章

复杂适应系统理论

正如我们在本书第 2 章中所指出的,复杂适应系统(CAS)理论已成为当今复杂系统科学研究中的一个前沿课题,其成果在很多方面丰富和发展了复杂系统科学。故我们设专章介绍复杂适应系统理论。本章将以适应性为中心讨论以下问题:1. 适应性和适应性行动主体的概念;2. 适应性行动者的内部模型及其分类器;3. 遗传算法。后面的几种模拟与算法是对自然系统适应性的模拟。

10.1 适应性的概念

10.1.1 适应性的三要素

一个复杂系统的演化有许多原因:随机的事件,“通过涨落而有序”,不可预期的行动的反弹,行为规则的改变,控制者系统的指令信息的作用等等。如果这些系统的新的形式或状态对于系统的存在与发展来说比旧的形式有所改进,我们就称这种改进为进化。如果这种进化是由环境引起的,我们称之为适应。一个系统有能力引起自身在结构形式上与行为方式上发生改变,做到对环境的适应,我们便称该系统具有适应性。一个系统何以具有适应性变化的能力呢?它必须具有多样性的变异,并有能力保存这样的变异。而环境何以能引起系统相应的变化呢?这是因为它能对系统的变异进行选择。从进化论的观点看,适应性本身就是我们在 4.5.4 所说的广义达尔文主义的基本原理——“自发的多样性变异和选

择的保存”^①的另一种说法。所以适应或适应性可以用一个公式来表达：

适应 = 多样性变异 + 遗传性保存 + 环境性的选择

对于适应性的这几个要素，可分别解释如下：

1. 多样性的变异。多样性指的是种群中个体的多样性，即个体之间在结构功能、行为性状上的不同。系统中的个体行动主体突现类型越多，其中包含能适应环境的类型的概率就越大，从而进化的潜在可能性就越大。而这些个体的结构功能、性状行为的多样性和变异性越大，就越能对抗环境的干扰，从而被环境选择的概率就越大。例如，单一农作物耕作制度最容易发生病虫害和其他欠收灾难，而多种经营最容易适应环境。人体的免疫系统之所以能对付从环境中入侵的各种各样的病菌病毒，就是因为人的淋巴细胞有足够的多样性和变体，当特定病菌病毒入侵时，能选择变体加以复制以对付入侵者。艾什比曾提出必要的多样性定理以说明系统要适应和控制环境，对付外来干扰必须有足够的多样性。复杂适应系统理论则说明，如果这种多样性与变异能自发地产生而作为复杂适应系统的适应性行动者，则能通过对环境进行建模而具有多样性适应能力。在本章要讲的各种进化算法中，关键的因素就是并行的多样性和空间的多样性。

2. 保存与传播的机制。即 CAS 使适应环境的被选择的变异体或突现体能保存下来、传播出去。这对于生物物种来说，是一个遗传机制，对于生命大分子来说是一个复制机制，而对于社会系统来说是通过亨德森（N. Henderson）所说的“文化基因”或道金斯所说的“Memes”来实现的。人类的语言、图书、学习过程、文化传统、科学规范以及神话、法律、制度等等起到如同遗传机制的作用。如果说，多样性变异的个体是一个空间多样性，则遗传便是一个时间上的持续性的形式，在进化的算法中，就是按一个个时步的叠代计算问题。

3. 环境的选择 如果我们生活在一个有无限资源的世界里，所有的有机体和复杂系统都有机会复制、再生自己的同类，可以说这就意味着生命以及其他复杂系统历史的终结，因为世界就不可能有进化。正是世界的资源有限，不同种类的生命有机体、行动主体、复杂系统远非都能复制自己，因

① D. T. Campbell, "Evolutionary Epistemology". In P. A. Schilpp. (ed.) *The philosophy of Karl Popper*. The Library of Living Philosophers. 1974. p. 421.

此,不可避免地存在着环境的选择以及“最适者生存”问题。“最适者生存”(Survival of the fittest)这个命题,在生物学史中常常受到非议,有学者认为这个命题是“同义语”的反复,等价于“生存者生存”(Survival of Survivors)。“适者生存”确实是“能繁殖者生存”的意思。我们不能独立于复制能力、繁殖能力这个意思来列举“最适者”的特征,例如用聪明、伶俐、身强、体壮、鲁棒性、灵活等特征来定义“最适者”。大家想想那个孔雀的尾巴,除了有助于吸引异性、从而有助于繁殖能力之外,很难指出它还有什么体能上的用处。不过这个循环定义并非恶性循环,它使我们能够对不同的复杂适应系统的生存能力做出一种比较。例如过去东南亚(包括泰国、老挝、越南等)种水稻者的生存能力大大强于通过砍烧森林来种植旱稻的人口,使前者能统治、支配后者,这就是一个生存能力的比较。

下面从生存能力的比较意义上来给适应性下一个定量的定义。所谓适应性,就是一个复杂系统的生存概率,用适合度 $F(x_i)$ 来衡量,这里 x_i 表示第 i 种行动者 x 的变异体,这里:

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^n P(x_i \rightarrow x_j) \Delta t_j - \sum_{i=1}^n P(x_i \rightarrow x_j) \Delta t_j$$

其中 $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, n 表示行动者个体变异的多样性数目; $P(x_j \rightarrow x_i)$ 为 x_j 转变为 x_i 的概率,即有限的资源因 x_j 的数量缩减而转移到 x_i , 导致 x_i 的增加的概率; $P(x_i \rightarrow x_j)$ 为 x_i 转变为 x_j 的概率。 Δt_j 表示 x_j 的平均寿命。这个公式是 F. 海里津创立的^[1], 右边第二项和 Δt_j 的因素是我们根据 M. 艾根的超循环理论中的“选择动力学”对其所做的修正和补充^[2]。

不过这个对适应性 (adaptive) 或对环境适合度 (fitness) 的测量,本质上还是用该变异种群的存活与繁殖率来做的总体测量。

所谓选择就是系统的变异体的多样性在环境的压力下的减缩过程,这个过程使一些不适应环境的系统变异体、可能性与替代方案被排除。这就是所谓“适者生存,不适者淘汰”的原理,它与系统自组织和系统共生的原理是相辅相成的。

[1] F. Heylighen, "Definition of Fitness". (1996) <http://pespmc1.vub.ac.be/FITTRANS.html>.

[2] M. 艾根、P. 舒斯特尔:《超循环论》(1979),曾国屏、沈小峰译,上海译文出版社1990年版,第24页

▷▷ 10.1.2 适应性景观

适应性及其变化的概念最好用一种直观的隐喻的方法来进行表达。适应性景观(fitness landscape 或 adaptive landscape)这个概念是1932年由生物学家、群体遗传学创始人 S. 怀特(Sewall Wright)^①首先提出的,近年来已被推广到经济、管理学和计算机的进化算法(evolutionary algorithms)中。生物学告诉我们,基因会发生突变,突变可能增加也可能降低该后代的适应性。但自然选择会选出高适应度的突变并遗传下来构成基因的进化。而不同基因的组合(如杂交)也会改变后代的适应性,某种基因组合及其后代组成的种群会有比较高的适应性。因此,所有可能的基因型以及它们相应的适应性(adaptive)或适合度(fitness)便组成一种适应性景观。假如基因型的不同组合用一个二维平面表现出来,而不同基因型的适应性(或适合度)用一个高度表现出来,这样适应性的变化便在二维平面上的三维空间表现为许多山峰和山谷。于是存在着某个地区的山峰,其高度表现出这个基因型的高适应性,从这里出发的状态空间轨线都是走下山,走向适应性低的方向。在这空间中存在着某些山谷,它的适应性最低,从这里出发的轨线是走上山的。当然一山还有一山高,一谷还有一谷深,这样组成的一个崎岖不平的状态空间图景叫做三维的适应性景观。(参见图 10.1)

通过自然选择的进化就是一个爬山运动。在图 10.2 中,我们用 x 维表示不同的基因型,用 y 维表示适应性的大小,箭头表示适应性进化着的种群在适应性景观中运动的方向,A、B、C 为高峰,黑球指示着一种种群由低谷走向山顶。模仿生物进化的过程,数学家运用适应性景观的概念,创造了一种进化优选方法(evolutionary optimization methods)。设有传递邮件的邮车,按收件人的地址传送包裹。邮车走向各个地址有许多可能的路径,但哪条路径最“好”?这只需要引进一个标量函数 $f(s)$,其中 $f(s):S \rightarrow R$, R 为一实数数字。 $f(s)$ 是简单的,但 S 却可以是很复杂的,它包括各个邮件的邮址信息。 $f(s)$ 被称为适应性函数(fitness function)或适应性景观。 $f(s)$ 在这里用开车路上平均每小时投邮的数量来表示。这就是求 $f(s)$ 的最大值问题,解

① Sewall Wright, "The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution." In *Proceeding of the Sixth International Congress on Genetics*, 1932, pp. 355-366.

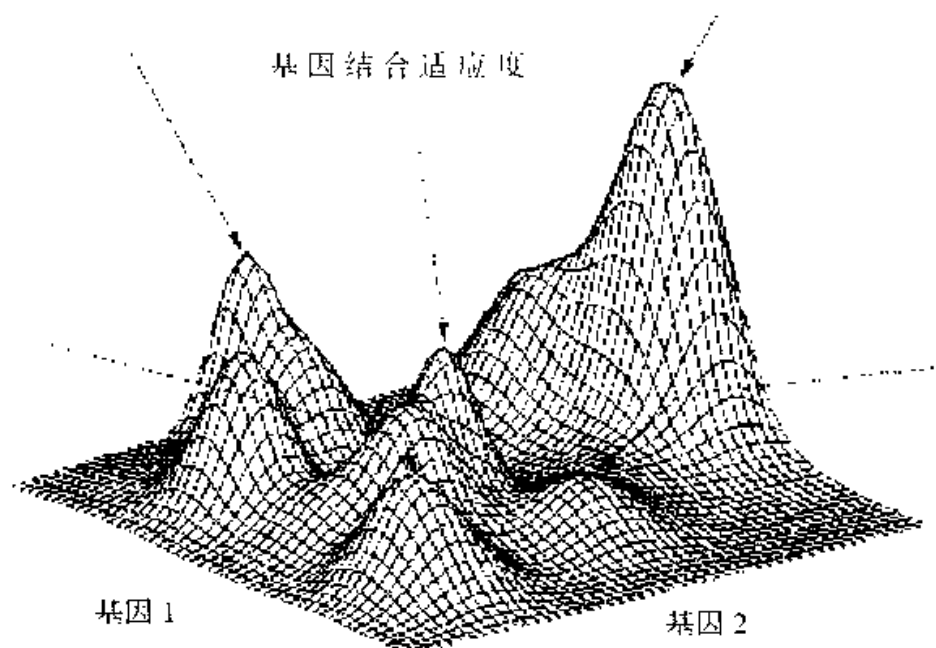


图 10.1 三维适应性景观图

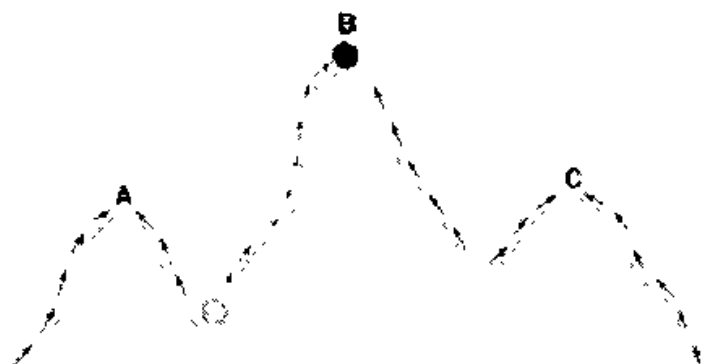


图 10.2 适应性景观上的进化

题的步骤是从一个随机解答开始,然后通过突变和选择,选出优于初始解者。这个问题的解法容易找到适应性景观的局部的山顶,但要历遍所有可能的路径,求得最优解,并非一件容易的事情。

无论是在自然的选择还是在人工的计算优化选择中,“解”会滞留在一个局域性的山峰上而不达到全局性的顶峰上,惟一的解决办法就是给系统注入一个“噪音”或随机的扰动,使系统离开局域性的山峰而走向更高的山峰。例如在图 10.2 中,给 C 点上的球以一种向左的干扰力,就有可能使它爬到 B 点。所以在这里噪声或涨落会增加系统的适应性,这就是上章我们所说的“通过噪声而有序”的道理。图 10.3 表明系统向适应性景观的最高

点进化。假定出发点的基因型是序列 CC, 它的相对适应度为 4, 而另一序列 UU 的相对适应度为 10。CC 突变直接进化到 UU 的概率较小(用细线箭头表示), 而突变到 CU (相对适应度为 1) 与 UC (相对适应度为 6) 的概率比较大(用粗箭头表示), UC 上坡比较容易, CU 虽表示已经向低适应度转移, 但 CU 仍然具有较大的基因库朝 UU 进化。这些表明系统通过不同的方向向最高点进化的过程。

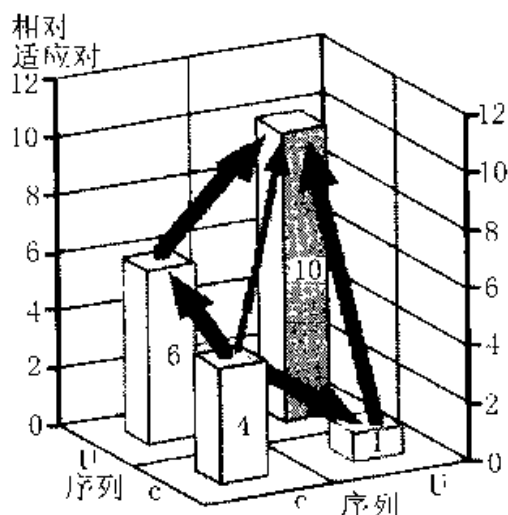


图 10.3 向适应性景观的最高点进化

通过适应性景观向适应度最大的方向进化的适应性函数概念, 实质上对应于物理学上系统朝位能最低点运动或势函数的最小值运动的趋势。只不过按习惯一个是最小值, 一个是最大值, 只要将其中一个函数乘上 -1 , 这个“物理学的景观”和“生物学的景观”就会统一起来。

▷▷ 10.1.3 简单的适应和复杂的适应

从最一般的意义上说, 适应就是一个反馈的过程: 即环境的变化引起系统内部变化、而系统按照自己的基准信息反作用于环境的过程。在研究复杂适应系统的适应性时, 我们需要区分两种适应:

一种是简单适应或直接适应。例如通过空调机来调控室内温度, 这是适应性自稳定。将空调温度调节到特定的温度基准值, 空调机就适应了外界环境的变化, 在空调机内并没有一组竞争着与进化着的图式。控制论主要是研究这种适应。另一种适应, 是通过选择和改变图式的适应, 这就是复杂适应。它包括了一系列计算、认知、图式的选择与改进的过程。自然界、机器和社会的进化经历一个由直接适应到初步复杂适应、再到复杂适应的过程。

例如机器人的发展, 就经过了以下三代:

第一代: 旧式控制论机器人时代, 它的原理是预先设置好目标状态, 遇到墙壁就绕过去, 遇到凸起高地就爬过来。

第二代: 专家系统时代。以决策树的形式将“内部模型”输入计算机。

例如自动诊断机能依病人的不同数据诊断疾病。但程序预先编好,不能学习和积累诊断经验。如果将计算机诊断失败的资料交由专家去重新设计内部模型,这样一个人—机系统就可以成为复杂适应系统。

第三代:复杂适应系统机器人。它能学习,经变异与选择形成新图式。麻省理工学院 1994 年制造的六腿机器人属于这种初步复杂适应机器人。它运用了我们后面将要讨论到的遗传算法,可见它是有复杂适应能力的。

这种从直接适应到复杂适应的发展,不同水平的适应性的区别,也体现在人类社会的发展中

人类社会也有一种相当于生物基因那样的图式。它包括风俗习惯、特殊传统、神话、法律、制度等等。这就是我们前面讲到的“Meme”。这个图式按照 CAS 理论,当然也包括社会群体的行为指令(Prescriptions for collective behavior)。

第一种水平或第一个层次的适应是直接适应。它是在某一特定时期特定图式对气候、敌对因素入侵等环境变化的反应结果。例如,当气温变得比较暖和、干燥时,一个社会集体可能要搬到高地上的村落中去,或者举行求雨祈祷。当领土被敌人入侵时,这个社团的全体成员可能退守到一个有防守设施的城池,在那里储备粮食、用水,进行抵抗。这是一种不改变基准信号和目标图式的适应。

第二种水平或第二个层次的适应,就是改变图式。如果占优势的图式尚未能达到满意的结果,一个社群就会开始改变图式。如久旱祈雨不能缓解旱情,就可能有更新的宗教仪式起而代之;或使用新的农作物和进行新的灌溉方法。如果向森林退却不能抵御敌人进攻,则可能派遣一支队伍向敌人后方出击等。

适应的第三种水平或第三个层次,就是达尔文的群体生物学的最适者生存。即不仅图式彻底失败,而且整个社会解体或消亡,残余个人加入其他社群中去了,大概所谓亡国、灭种以及整个文化衰落就是这种情况。

在竞争与适应的过程中,因不适应而导致淘汰或死亡,可以采取生物物种群体灭绝、大量个体死亡的形式,也可以不采取这种形式,例如用思想图式的排除、遗忘或被合并而使之处于被支配地位,以代替具有这些思想图式的个体或群体的消亡。盖尔曼在《夸克与美洲豹》一书中讨论了

这个问题,^①得出了哲学家波普许多年以前得出的结论。

►► 10.2 适应性行动主体

适应性行动主体是在一定层次上收集有关周围环境以及它自己和自己行为的信息、然后加工与处理这些信息、并向环境输出信息和作用、从而适应环境的行动主体。

▷▷ 10.2.1 适应性行动主体的基本特征

在圣菲研究所中,盖尔曼比较集中地研究了适应性行动主体概念,总结了适应性行动主体的基本特征。盖尔曼说:“以下是复杂适应行动者的一般特征:

1. 它的经验可以看做是数据集(set of data),通常这是从输入到输出的数据,其输入通常包括系统的行为,而输出通常包括对系统的效应。

2. 系统在经验中识辨出一定种类的被觉察的规律性,即使有时这类规律性被忽略了,或将某种随机特征当作了规律性。其余的信息都当作随机的东西来处理,这些信息大多数通常都是随机的。

3. 经验不仅仅记录在查阅表中,而且被觉察的规律性被压缩为图式。多样种类的突变过程引起竞争着的诸多图式,每一种图式以它自己的方式提供了描述、预言和(与行为相关的)行为指令的组合。它们提供了甚至是从来未遇到过的东西,所以不能从内插与外推中得出,而是经常从比较成熟的经验扩展中得到。

4. 在现实世界中图式所获得的结果反馈回来,影响到它在与它竞争着的其他图式中的地位。”^②

以上是盖尔曼着重从复杂适应行动主体如何处理信息的角度概括出的四大特征。这里以及他有关这个问题的其他论述有好几个关键词需要注

① M. 盖尔曼:《夸克与美洲豹——简单性和复杂性的奇遇》,杨建邺、李湘莲等译,湖南科学技术出版社2001年版,第十九章。

② G. Cowan & et. al (eds): *Complexity: Metaphor, Models and Reality*. SF1 studies in the sciences of complexity. Proc. Vol xix, Addison-wesley, 1994, p. 18.

意。这就是：数据流（data flow）、规律性的识辨（identified regulation）、压缩为图式（compress into a schema）、竞争（competition）、选择压力（selection pressure）。我们可以将复杂适应行动主体处理信息流的行为特征绘图如下（这个图的要领由盖尔曼在《夸克与美洲豹》一书给出，我们有一些修改）：

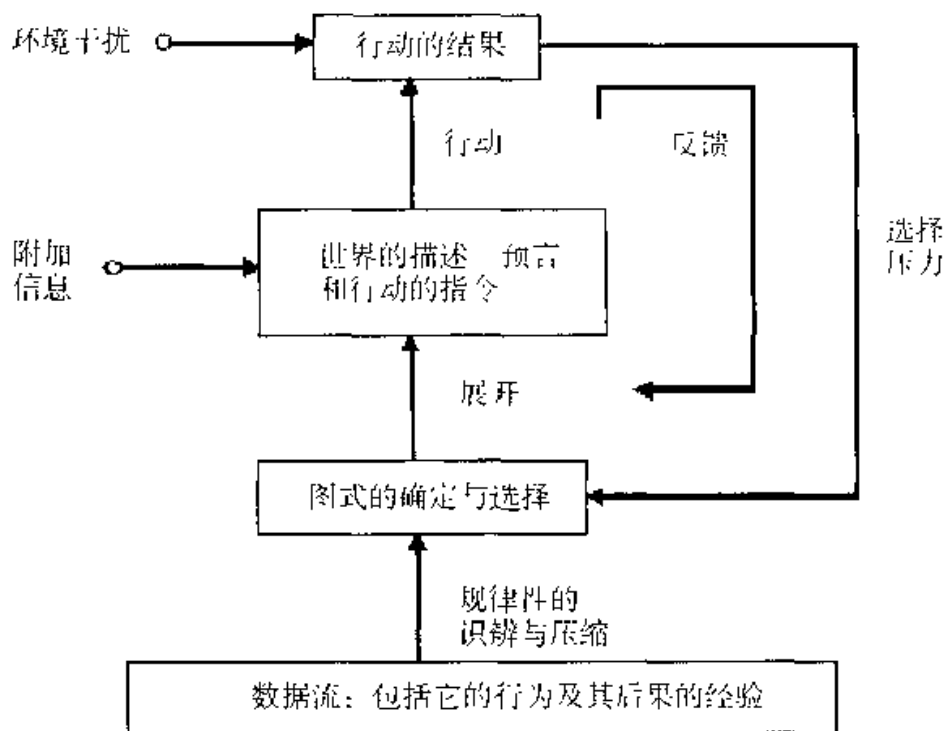


图 10.4 复杂适应性行动主体的运作

▷▷ 10.2.2 适应性行动主体运作的案例

适应性行动主体的适应性行为可以用下列几个例子来加以说明：

例 1：找出租汽车的行为适应性。

我们本身就是一个复杂适应行动者。我早上 7 时半必须在宿舍门口搭上“的士”（出租车）到某大学上课。在我面前奔驰而过的出租车在我的脑海中组成经验资料或数据流，包括来一部不停，再来一部又不停。这是川流不息的随机出现的经验或数据流。在这个过程中，我首先识辨出一种规律性：凡出租车挡风板上不亮灯者为有乘客。于是我的图式是“寻找亮灯的的上”。这个图式加上一些附加信息，例如来了一部亮灯的汽车，使我赶快向前走，但总是被别人抢先截走。于是这个不适应的选择压力使我修改

“图式”:必须向前走到等的上人群的最前面去拦截亮灯的上。这就是我的行为按我的目标对于环境的适应性。这里用的是一般控制机制,所不同的是这个控制机制有一个图式的形成(建模和多一对应,对偶然性的排除和对规律性的识别以及对信息的压缩等问题)和图式的选择问题。

例2:儿童对语言的学习和语法的建构.

儿童学习说话,有一些话合乎语法,有一些话不合语法,他们是在父母或其他人的帮助下建立一个查阅表的。每说一句话,如有人告诉他不合语法,就归入“错”的一类,合语法就归入“对”的一类。如果这样学,假定儿童有过目不忘的超人记忆力,每天检查50个句子,每年检查 $365 \times 50 = 18250$ 个句子,则3年检查54750个句子。但是要使用语言,几乎有无限多的句子要说,这样掌握语法事实上是不可能的。

儿童们必须先从听许多话和说许多话的信息流或数据流中建构一套判断合乎或不合乎语法的临时规则,作为图式来使用,例如建立动词过去式要加d或ed的规则。但是当遇到一些特殊语句时,他们可能会说:“I sing the song today”,“I singed the song yesterday”。但这一次他们的临时规则遇到了麻烦,他们的父母会纠正他们,说:“you must say: I sang the song yesterday”。于是他可能又建立另一个临时规则,凡是动词后缀ing都要改成ang。可是有一天他们会说:“I brang a cat to you yesterday”。这个新图式又遇到了麻烦,他们的父母纠正他们说:“you must say: I brought a cat to you yesterday”。当然,附带说一句,语言学家乔姆斯基指出,儿童学习语法,还有先天因素。这里讲的是后天因素。

盖尔曼总结道:“一个这样做的小孩就显示出了复杂适应行动者的第一个特征,他或她把从大量经验中识别出来的规律性的东西压缩成一个图式,这个图式包含了支配那些经验的规则,但忽略了作用这些规则的特定环境。”“学习语言的过程也表现出在运作中的复杂适应系统的其他特征。一个图式很容易发生变化,不同变异形式的采用与废弃,都要经过实践的检验。”“给各种不同图式之间的竞争施加选择压力;一些图式被保留下来,并可能升级”。^①

^① M·盖尔曼:《夸克与美洲豹》,杨建邺、李湘莲等译,湖南科技出版社2001年版,第24、53页。

例3:细菌产生耐药性的适应过程。

生物进化过程本身就是一个复杂适应系统的行为,一个生物有机体的祖祖辈辈的生活经验,特别是其成功经验,并不是简单地被记录下来,形成一个可供参考的查阅表,而是把经验中有利于生存的规律性通过其基因记录下来,压缩成基因型表示的信息串。基因型就是该生物进化过程的图式,这个图式控制着并和变化着的环境一起决定着该生物的表现型。由于基因是由长长一串 A、C、G、T 四种核苷酸链组成的,最简单的大肠杆菌就有 500 万个核苷酸,这么长的链并不是绝对稳定的。由于宇宙线、化学反应、复制错位、缺失等等在导致某些等位基因的突变,基因图式容易以突变形式发生变异,有些变异图式在正常的条件下在选择压力面前并非有利。我们身体中有许多由外界环境进入的细菌和病毒。其中有一些突变成对抗生素不敏感的基因形式。当人类长期使用青霉素时,它们变得比其竞争对手更有生存能力,于是在大量使用青霉素的环境下存活下来,成了适应新环境的東西,“学到”了对付对其生存构成威胁的药物的本领。这是一种复杂适应性行动主体的行为,虽然它的适应与学习与我们找的士和小孩学语言的适应与学习有很大区别,不过依然符合盖尔曼的模型中的图式和复杂适应性行动者的四项基本特征。

例4:科学理论形成与适应性进化——以波普科学理论进化模式为例(参阅本书 4.5.3)。

►► 10.3 模拟适应性行动主体建模功能的分类系统

我们在前面两节中已经看到,生命系统、经济系统、语言系统、科学系统都被看做是复杂适应系统,其中病毒、细胞、物种、公司、动物与人都被看做是复杂适应性行动主体。它们都有一个从环境中获得信息、将它们总结为图式或规律以指导或指令行动、从而使行动者更好地适应环境的过程。从本节开始的问题就是如何用计算机的算法来模拟这个认知和学习的过程,或从更长的有许多世代的视野来模拟遗传、变异和选择的问题。前者是一个个体的适应问题,或者还有文化的适应问题;后者是一个生物种群适应或基因适应问题。在 10.3 中我们讨论第一个问题,在 10.4 中讨论第二个问

题,在 10.5 中讨论自然界最复杂的适应系统即人脑的模拟问题。讨论这些问题的目的,并不在于研究这些算法在实际工作中有何应用,而是运用这些算法来确证与阐明本章所要研究的复杂适应系统的基本运作原理。可见,计算机模拟试验是系统科学的实验室。

▷▷ 10.3.1 行动主体如何通过分类器系统建立内部模型

主体内部模型是指一种结构,它不仅能探测到外界环境的特征,而且能确定主体的行动。霍兰说:“模型必须提示能改变环境状态的现时的行动,行动主体就在这个提示基础上进行行动。”^①主体必须有预言和指导行动的功能,而为此它们必须有接收和处理环境信息的图式、规则、编码、转换和译码的装置。我们把它们统称为行动主体的信息处理系统。

我们可以将主体看做是一个与环境发生输入与输出关系的信息处理和执行系统,在这个系统中有许多行动的规则或可能的规则,这些规则,在计算机科学中叫做“分类器”(classifier),而整个信息处理和执行系统被称为“分类器系统”。现在我们来分析主体是怎样通过这个系统来建立模型的,第 8 章我们讨论的鲍威斯的控制论模型,可供我们理解和整理这个信息系统参考。分类器系统由三个部分组成。

1. 探测器,即控制论中的传感器。主体被环境的大量刺激所包围,不可能全部接受这些信息,就像科学研究不是培根式的“收集全部感性资料”一样,行动主体必须筛选、分类,只接受对它的生存目的与预期有关的信息,并对它所选定的信息进行编码。如果使用二进制,则出现某种现象记作 1,不出现这个现象记作 0。这样,例如对于一只青蛙来说,如果它看到有物体、“有情况”,就它对于是否有(i)运动、(ii)有条纹、(iii)大的、(iv)在附近等四个特征来说,可以用一串二进制算符来表示。如果一个特征用一个探测器来测定,则四个探测器连成一组就可以对它编码,传递 $2^4 = 16$ 条信息。如这物体是运动的(记为 1),有条纹的(记为 1),小的(因不是大的,故记为 0),在远处的(因不在附近,记为 0),所以反映这个特征的符串就记为

^① John H. Holland: "Echoing Emergence". In G. Cowan & et. al (eds): *Complexity: Metaphor, Models and Reality*. SFI studies in the sciences of complexity. Proc. Vol xiv, Addison-wesley, 1994. p. 314.

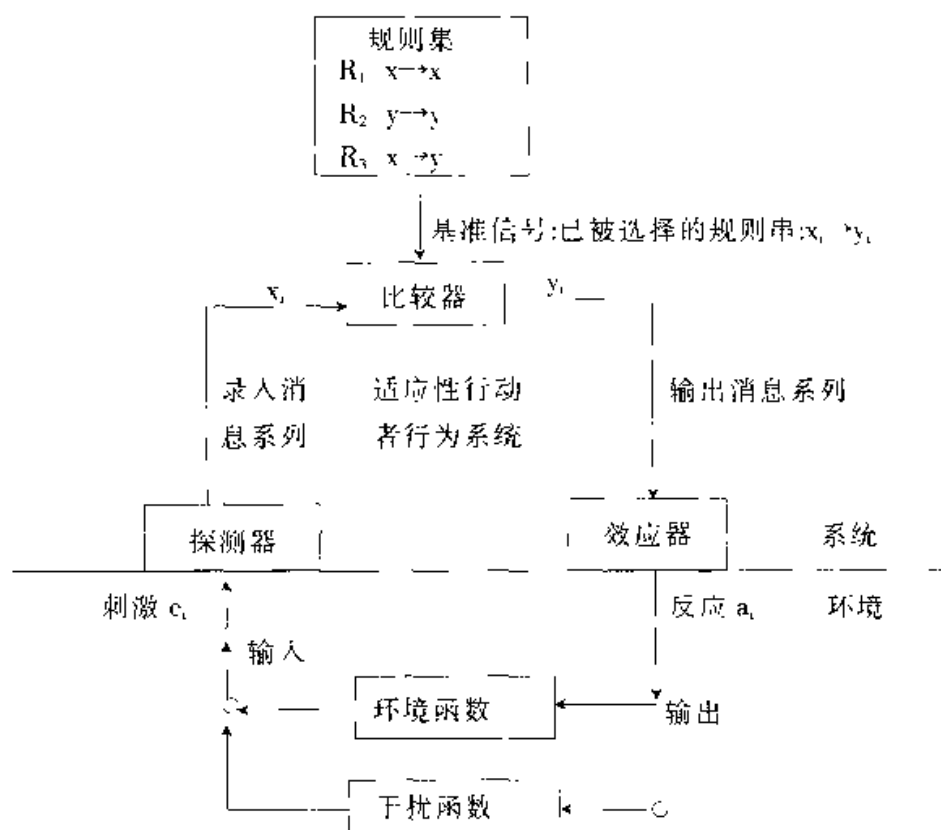


图 10.5 适应性主体的信息传递与决策执行系统

1100。如果青蛙有 20 个传感器或探测器,就可以传递 $2^{20} = 100$ 万种以上的信息。这是一个编码的过程。

2. 效应器:效应器的输出就是对环境做出种种活动作用,例如青蛙可以为—组消息所激活,做出(i)逃走、(ii)追击、(iii)转头、(iv)伸舌等等的反应。某—组动作、对应着—组消息,来自—组消息的激发,于是青蛙便有转头、逃走等等反应。设逃走、转头、追击、伸舌四种动作各有实行(1)和不实行(0)两个值,则转头逃走用 1010 来表示,即行动 $a_i = 1010$,表示逃走(1)、不追击(0)、转头(1)、不伸舌(0)。所谓“忙忙如丧家之犬,急急若漏网之鱼”,就是这种反应。追击、转头、伸舌对应着 0111。而所谓“饿虎擒羊,狼吞虎咽”也是这种反应。不过这里讲的是一只青蛙罢了。这些动作就是对信息 y_i 进行译码的过程。第(1)(2)两点,已经验证了上面所谓的行动主体行为多样性原理。一个行动主体能处理的相关信息越是多样,它的反应方式越是多样,就越能适应变化多端的环境。

3. 规则 从输入到输出、从刺激到反应有一系列中间规则,这些中间

规则采取如果/则(IF/THEN)的形式出现:If 1101, Then 0111。不过事实上在刺激与反应、条件与反射之间有一系列用中间规则将它们连结起来的过程,建模就体现在这为了一定目的而连结的建构过程之中。这里有三组不同的规则必须加以区别:第一组来自探测器,处理环境信息(如果环境有什么消息 e_i ,则发生某种消息 x_i ,即 $e_i \rightarrow x_i$)。请注意,这里 i 是一个集合,即 $I = \{i | 1, 2, 3 \dots n\}$,第二组是通过效应器发出作用于环境的消息(如果有某种消息 y_i ,则发出行动信息 a_i ,即 $y_i \rightarrow a_i$)。第三组是如果有某种消息 x_i ,则发出某种消息 y_i 。不过从 x_i 到 y_i 有一系列中间环节,其中有一系列规则在起作用。运用集合论中的函数与映射,我们可以将这些规则记为: $R_1: x \rightarrow x, R_2: y \rightarrow y, R_3: x \rightarrow y$ 。关于这个比较和选择的过程,将在下节进行讨论。以上所述,用数理逻辑符号表示,就是 $e_i \rightarrow x_i, x_i \rightarrow y_i, y_i \rightarrow a_i$,等等。使用上述三个要点建模需要注意下列几点:

(1)任何一段消息都用二进制表示,这二进制算符组成的比特串,其数集记作 $\{1, 0\}^L$, L 表示消息的长度,例如上面说到的 If 1101, Then 0111, 或 $1101 \rightarrow 0111$ 。无论输入消息还是输出消息都是属于集合 $\{1, 0\}^L$,即消息长度为 L 。现在我们在规则的前件部分和后件部分都可引进一个符号“#”,表示“不确定”,“不在乎”也就是说“#”无论是0是1,还是不确定,该串符号照样起作用。例如我们有符号串 $(1 \# \# \# \dots \#)^L$,作为以1开始的任何条件,规则都会作出反应。例如青蛙对条件作出反应的例子:

IF(运动)(#)(大)(#)…, THEN 逃走

IF(运动)(#)(小)(在附近) THEN 逼近

这就使得一个带(#)的符号串反映了各种可能的状态,从而使规则概括了各种不同情况,反映了一定的规律性,成为一个有关消息的分类器。这里分类器有一个使用三值逻辑的数串,其集合为 $\{1, 0, \#\}^L$ 。分类器由于带有 n 个#的符号,一方面,它可以与一个精确消息相匹配;另一方面,它潜在地与 2^n 个不同信息相匹配,把 2^n 个不同信息归入它的类中。在这里,分类器与一般特征、规律性和规则实际上可以当做同义语互用。

(2)要特别注意第三组规则的多样性。IF x_i THEN y_i 等等的中间规则,不是起源于环境的消息,也不直接起到激发效应器的作用;它可以大量存在,同时被激活,而不担心规则之间发生矛盾;即使发生矛盾,也不会对建模有影响,相反却可供建模时进行选择,并成为建立复杂模型的“积木”。“积

木”的种类与数量越多,建构模型的备用件越多。这是因为内部模型必须预见环境的未来状态,而如果未来出现的是过去从未出现过的环境新状态,主体怎样预言它?这就是利用这些备用规则作为积木。任何一种规律性都对应了世界的一个可能状态的等价类,当这个规则性为规则所掌握、作为它的条件时,它所对应的等价类就成为构造模型的“积木”。霍兰说:“我们能够借助于被称为‘积木’的较简单的组成部分建构几乎是现实世界的任何东西。进而,有限数目的积木可以以许多种不同方式重新组合,产生现实客体多样性描述和多样性模型。”^①例如,如果选择头发、前额、眉毛、眼睛等10个特征,每个特征有10个不同的形态(如眼睛有蓝眼睛、褐眼睛、大眼睛、小眼睛等10种形态),则这 $10 \times 10 = 100$ 块积木可以组合成 $10^{10} = 100$ 亿张不同的面孔,比现在世界上的人口还多。这就是所谓简单少数的元素与关系组成了复杂多样的可能世界和可能模式的情形。

现在,我们来构造一个规则集的最简单模型,这里规则集是不随经验的积累而改变的,但它却是适应性主体行为的基准,而这些规则集如何随经验的变化而改变,则放到10.3.2进行讨论。图10.6是图10.5的某种例示,下面说明它的运作步骤:

设有前例所说的青蛙,它的周围环境有如下特征:某种东西是运动的、无条纹的、大的和就在附近。第1步:它的探测器将这些特征编码为1011。第2步:它将测得消息记录在消息系列中。第3步:将消息系列与蛙脑中集中每个规则的前件进行比较,从中选出与经验相匹配的规则,这里是分类器中规则的头二条,记入比较器中。第4步:在相匹配的规则集中取出行动规则的后件1010记入行动集,并提供给效应器进行译码。第5步:根据译码采取行动。这里就是逃走。这5步完成了一个循环。第6步:开始进入第二个循环的时步(time step)。在这里有一点要提请读者注意,本小节依圣菲研究所的传统,使用刺激与反应的行为主义术语,但我们的论述却不是行为主义的,因为我们特别重视目的性和基准信息的作用,并将规则集的主要部分放入基准信息的范畴中(参见第8章的有关论述)。

① John H. Holland: "Echoing Emergence". In G. Cowan & et. al (eds): *Complexity: Metaphor, Models and Reality*. SFI studies in the sciences of complexity. Proc. Vol six, Addison-wesley, 1994. p. 314.

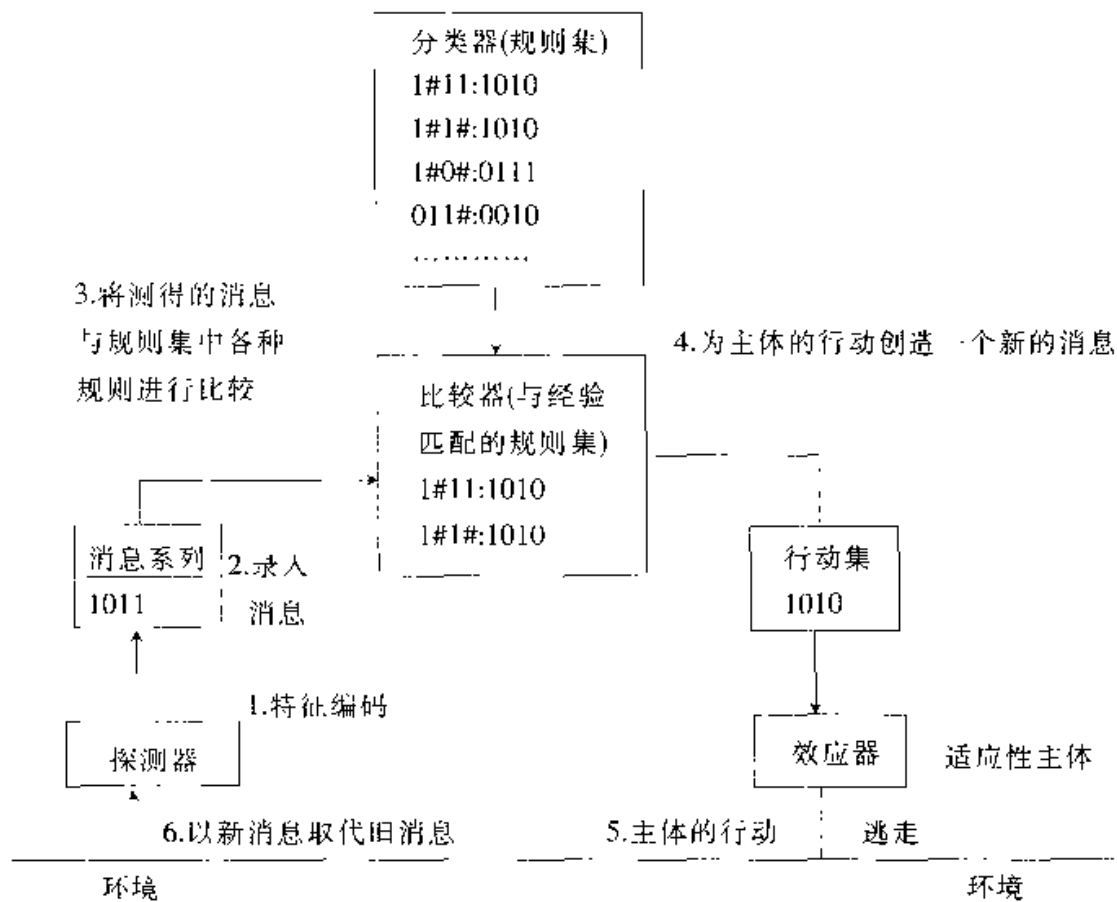


图 10.6 适应性主体按规则行动的简单适应系统

▷▷ 10.3.2 分类器系统及其对环境的适应

前面我们讲过,主体建立的模型中有许多竞争规则。主体如何选择这些规则来组成规律串呢?这就需要按照这些规则对于达到系统目标的有用性来分派给每一个规则以某种信用度或信赖度,即这个规则的强度或它对环境的适应度(可适合度,degree of fitness)。一个规则如果立竿见影,马上见效,自然有很高的信用度和适应度。比如我拿着自己的汽车钥匙,就它是否能打开我自己的汽车来说,其信用度或信赖度就很高。不过大多数的规则并没有如此直接的作用。例如,假设我们只从功利的眼光来看我们开设的课程,那么我们上的每门课对于我们毕业后的工作有什么好处、它有多大的信用度、或者应给它派多大的适应度,就很难说了。这是从功利眼光来考虑的有关不同课程的竞争和淘汰的过程,这里我们可以通过记分的方法来派给它适应度。于是就有一个信用分派或适应度量度的问题。

如前所述,几个规则一个接一个组成一个规则序列,其中每一个规则的形式都是“如果……则……”的形式,即如果具备条件 x_i ,则有行动信息 y_i (一般说来 y_i 就是向外发送消息),记作: $x_i \rightarrow y_i$ 。

x_i 是个符号串,定义域为 $\{1, 0, \#\}$,“#”在规则的前件中表示不确定、不在乎(don't care)的意思,而规则的后件 y_i 的定义域也是 $\{1, 0, \#\}$,在这里“#”还表示“可以跳过去”(pass-through)的意思。

从信息经济学的观点看,信息是值钱的,所以霍兰运用交易所拍卖的经济模型来评价规则的强度或适应度。他将所有的规则拿到交易所拍卖,这里不是拍卖规则,而是拍卖作为规则后件的消息。一个规则在规则串中与别的规则连在一起,并最后连结到环境效应——即发出作用于环境的消息,它必须“出售”自己的后件,让别的规则“购买”才能连结起来,而只有那些有实力的、有高适应度即强度的规则,才能购得起出售者的后件,并售出自己的后件。这个投标价(bid)如何决定?它服从于下面的公式: $Bid(R, t) = a \times Strength(R, t) \times Specificity(R)$ 。即 $Bid = a \times \text{强度} \times \text{具体度}$ 。具体一点说,若有规则 R ,这个公式表示: a 是小于 1 的常数,通常取值 $1/8$ 或 $1/6$ 。强度(strength)指的是规则消息串被派给的强度或适应度。而具体度(specificity)指的是规则前件非#的数字长度除以规则式中的前件长度。即#的数量愈小,具体度愈大。由于这种规定,结果就有一组规则如同下图那样连结在一起

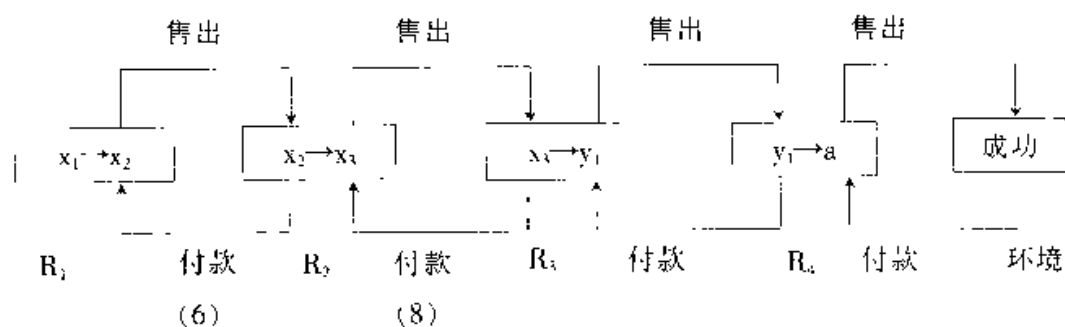


图 10.7 传递水桶算法示意图

若 R_1 的强度 $S_1(R_1) = 55$, R_2 的强度 $S_1(R_2) = 60$, R_3 的强度 $S_1(R_3) = 80$,则在交易后强度发生变化,以 R_2 为例,便是:

$$S_{1+1}(R_2) = S_1(R_2) - P_1(R_2) + P_1(R_3) = 60 - 6 + 8 = 62$$

于是交易改变了规则的强度。这里 $P(R_i)$ 表示规则 R_i 对消息的获得而给出的付款。依上图来说, R_2 付给 R_1 的款项为 6, R_3 付给 R_2 的款项为 8, 故 R_2 在 $t+1$ 时刻手中的资本比 t 时刻多了 2 (即 $-6+8=2$)。一般说付款降低了规则 R_i 的强度, 而接受付款则增加了它的强度。不过按上图所示, R_2 付给 R_1 以款项 6 (元), 而它从 R_3 中获得付款 8 (元), 故在 $t+1$ 时步里, R_2 的适应度或强度提高了 2 (元), 变成 62。它要提高强度, 最终必须从链条的最后成功中获得补偿, 因此霍兰提出规则的强度变化方程为:

$$S_i(t+1) = S_i(t) - P_i(t) - T_i(t) + R_i(t)$$

这里 $S_i(t)$ 为 t 时规则 R_i 的强度, $P_i(t)$ 为投标得主付给消息供应者的售价, $T_i(t)$ 为征税, 即对规则的不够活跃的一种惩罚, 而 $R_i(t)$ 为因规则串的成功而获得的奖赏, $S_i(t+1)$ 为经历了这些变化后在 $t+1$ 时 R_i 的强度。

对于每个规则的强度, 在没有经过成功与失败、达到系统目标还是没有达到系统目标的考验之前, 我们可以假定所有的规则有相同的强度, 然后在不断的适应环境的行动中修改这些规则的强度, 使它成为经验积累的结果, 便可以形成有不同适应度的规则了。请读者注意, 这个传递水桶算法所讨论的问题是规则集如何随经验的改变而改变的问题。它论证了规则集在环境的压力下的一个选择与淘汰的过程。它是第 1 节所说的适应性的第三特征: 环境的选择。霍兰把他创造的这种适应度或强度的算法, 称之为传递水桶算法 (bucket brigade algorithm)。所谓传递水桶, 就是古时候人们救火的一种方法: 人们从失火处到水池间排成一队, 传递水桶最后泼水救火, 与分类器系统通过规则串传递信息最后导致改变环境适应性行动颇为相似。这个算法是 Holland (1986), Goldberg (1985), Riolo (1986), Odetayo (1990), Wilson (1994) 等人先后创立和改进的, 是一种机器学习理论, 也是一种进化的系统理论。

参照霍兰和威尔逊 (Wilson) 的论述, 我们可以构造一个案例 1 说明分类器系统怎样通过经验积累不断进行学习、不断改进规则集来适应环境的过程。

第 1 步: 这里设探测器测得的特征进行编码后为 0011。第 2 步: 将 0011 与规则集中的规则前件进行比较, 找出与 0011 相匹配的规则 #011: 01:43, #0##:11:14……等四条规则, 这里规则的表述第 1 项 (如 #011) 为条件项, 第 2 项 (如 01) 为行动项 (后件项), 第 3 项 (如 43) 为强度项, 说明该

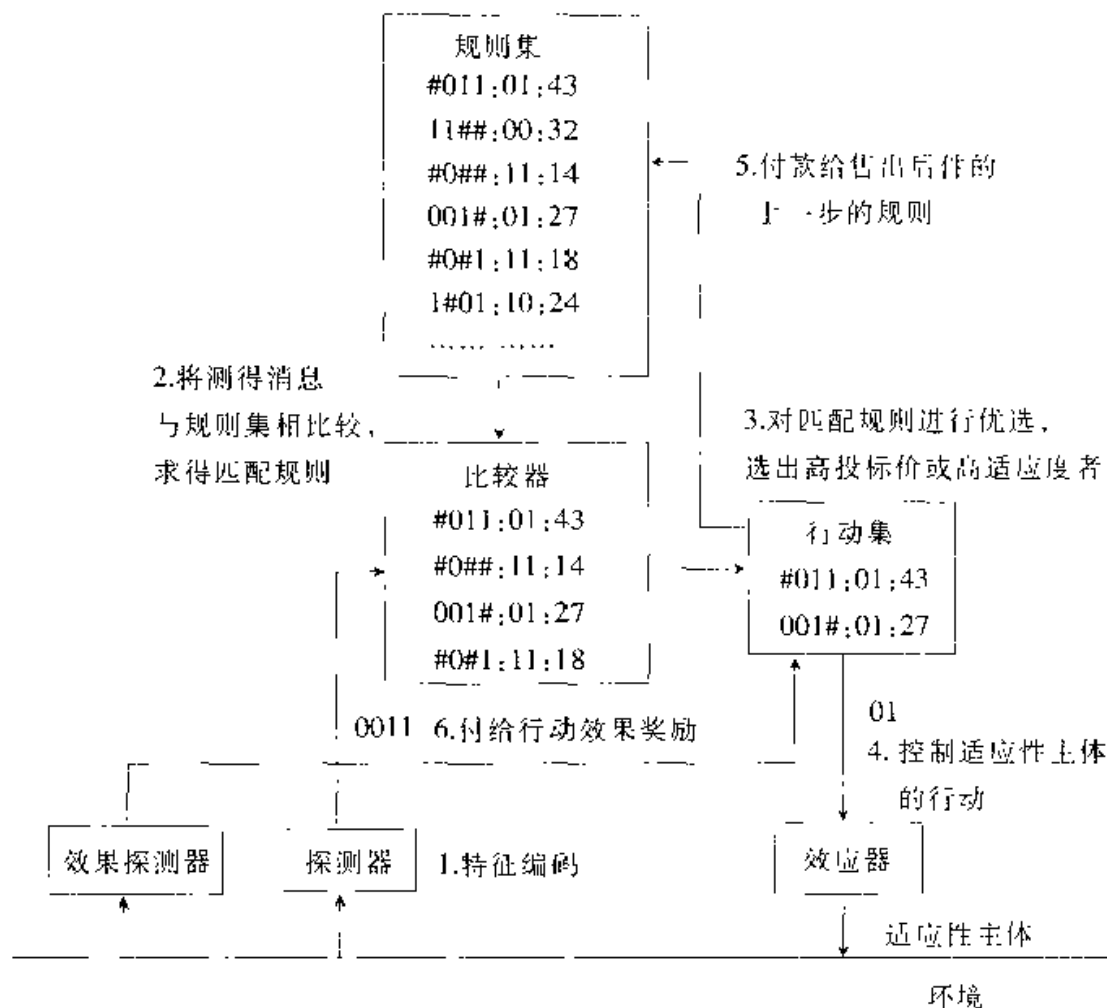


图 10.8 分类器系统及其对环境适应

规则的适应度。第 3 步: 对匹配规则进行优选, 从中选出有高投标价或高适应度的行动规则 $S(R)$ 。这里不是单个行动规则, 而是行动规则的一个集合。这些规则的后件相同, 即导出同样的行动。第 4 步: 将行动集后件 (这里是 01) 付诸行动。第 5 步: 按传递水桶算法, 付给上届行动规则投标款, 因为现在取得成功的行动集中规则前件有 00, 故款项应付给规则 11##;00;32。改动该规则强度 (32), 例如增加到 36 等等。第 6 步: 按行动效果对成功行动规则做出奖励。

关于如何从繁殖与更新规则的角度考察适应性行动主体的问题, 将在下一节遗传算法中讨论。在讨论遗传算法之前, 我们先将本节开始时讨论的适应性主体的适应行为的三个信息流与控制过程图式于后, 作为本节的一个简单的小结 (见图 10.9):

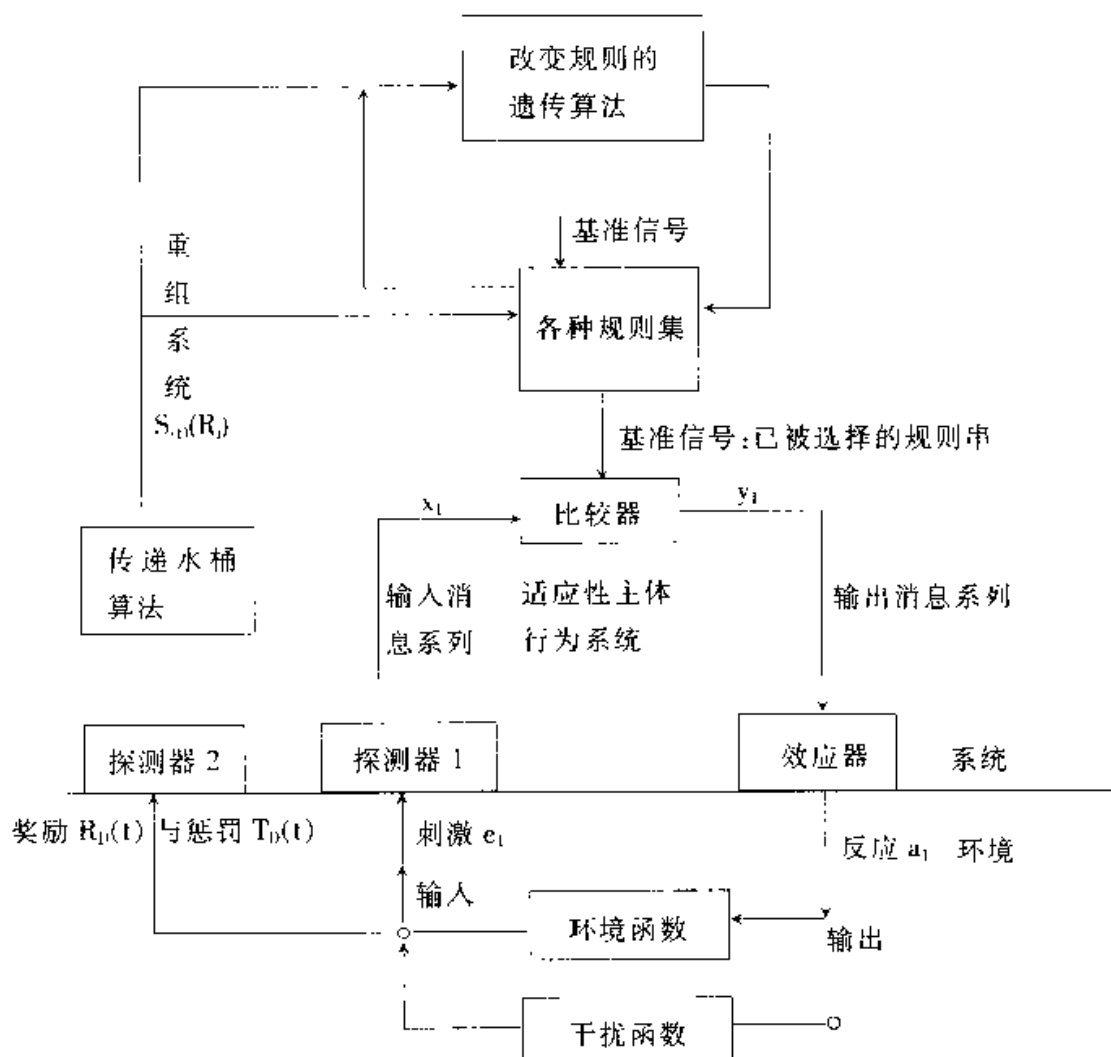


图 10.9 适应性主体的行为及其学习进化的信息流与控制图

10.4 遗传算法

早在 20 世纪 60 年代初,在传递水桶算法出现之前,在研究元胞自动机的基础上,霍兰和他在密歇根大学的同事们就意识到了生物进化过程中蕴含着朴素的优化思想,因此,他借鉴了达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传定律的基本思想(二者的结合,被称为新达尔文主义),并将其进行提取、简化与抽象,提出了第一个较为经典的进化计算算法——遗传算法。他在 1975 年出版了第一本比较系统地论述遗传算法的专著《自然系统与人工系统中的适应性》(*Adaptation in Natural and Artificial Systems*),标志着遗传算



霍兰 (John H. Holland)

法的正式诞生。

在这本专著中,他详细阐述了遗传算法的基本思想和结构框架。但是,只是在20世纪80年代在伊利诺斯大学召开了国际遗传算法会议之后,由于人们学术兴趣的增长和台式计算机的普及,这个算法才迅速地发展起来。1989年产生了第一个商业用途,现在美国最大的500家公司都运用遗传算法来解决困难的时序安排、资料管理、测定趋势、制订预算以及其所谓的“组合最优化”问题。

▷▷ 10.4.1 对生物学遗传与适应的算法模拟

遗传算法是对生物遗传和自然选择进行计算机模拟的产物。因此有必要对被模拟的基因遗传学和分子遗传学的相关部分做一个简单的介绍。达尔文提出自然选择理论时并不知道遗传和变异的机制,后者是由基因遗传学和分子遗传学来阐明的。1866年奥地利的修道士和植物学家孟德尔公布了他所发现的基因遗传学第一定律,即遗传因子分离律:在体细胞中,遗传因子(即基因)成双存在,形成生殖细胞(配子)时,遗传因子各自分离成单存在,配子结合成合子时基因又成双存在;基因决定生物性状,共同决定一个性状的两个基因称为等位基因,将遗传性状表现出来的基因叫做显性基因,否则就叫做隐性基因。在孟德尔的豌豆遗传实验中,高秆豌豆和矮秆豌豆杂交并不会得出中秆(中等长度的)豌豆,而是得到或者高秆(它的等位基因呈显性)或者矮秆(高秆等位基因呈隐性)的后代。这就是一个基因(或一对基因)决定一个性状。孟德尔还发现了基因遗传学第二定律:遗传因子自由组合定律,即非等位基因在细胞分裂过程中可以自由组合。例如豌豆的颜色有黄的或绿的,其形状有圆粒或皱粒。颜色基因与形状基因是非等位基因,它们可以自由组合成黄圆、黄皱、绿圆、绿皱四种后代。1908年美国基因遗传学家摩尔根补充了基因遗传学第三定律,即基因连锁和交换定律,指出一条染色体上有若干基因是连锁在一起的,而不能自由组合,但同源染色体之间有部分的连锁基因可以交换其等位基因,因而孟德尔二种颜色和二种形状的自由组合可以用等位基因交换来解释。

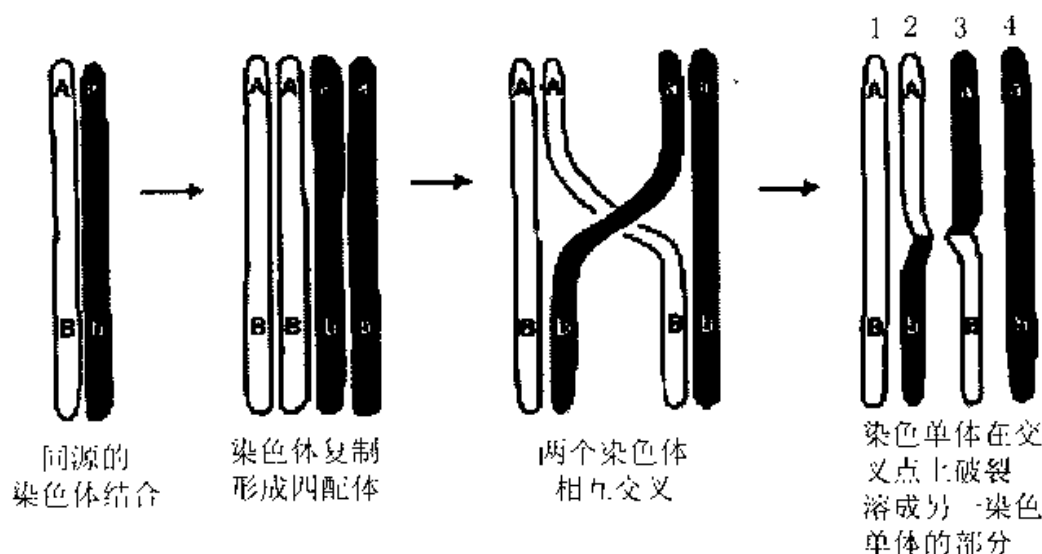


图 10.10 等位基因的交流

1953 年,克里克和沃森发现了基因的化学基础,它就是脱氧核糖核酸(DNA)的双螺旋结构。DNA 双螺旋各条都由四种核苷酸 A(腺嘌呤)、G(鸟嘌呤)、C(胞嘧啶)、T(胸腺嘧啶)组成,它们的核碱基的氢键配对是:A—T、G—C。例如 DNA 一条链的组合“ACTTGA”由“TGAAC T”配对,反之亦然。这样,根据遗传中心法则,DNA 的三联码决定了对应的氨基酸(有 20 种),从而形成了各种各样的蛋白质。作为建筑材料,一个有机体的所有部分,从皮肤、骨骼、眼睛、大脑到血液都由此而形成。在有机体中,DNA 组成很长的碱基的链。在较高级的有机体中,这个链就是染色体。遗传的密码就记录在这里,这个密码由 A,T,G,C 四个字母写成。不过这个密码的某个位点因为种种外部和内部原因以及在 DNA 的复制、转移和修复过程中都会发生随机的置换、移码、缺失和错位等突变。

根据基因遗传学和分子遗传学,自然选择问题就成为选择最优的、最适应环境的基因组或“染色体群”的问题。

进化论思想和遗传学理论为什么能给通过计算机进行随机搜索最优解的算法提供启示呢?我们回忆一下 4.5.3 中讲过的广义进化论。从广义进化论的观点看,波普说“所有有机体都昼夜不停地从事解决问题”。那些基因的突变和性状的变异不过就是各种解决问题的试探方案。自然选择就是在不断变化着的可能解决方案的空间中搜索出最优的、最适应环境的解决方案。所以进化论本质上就是寻找一个解决生存问题的算法。反过来说也

是一样,模拟生物遗传、突变与选择就有了一个进化算法,其中特别重要的一类就是遗传算法。下面有一个表,表明遗传算法上的一些术语与遗传学和进化论的一些术语是对应的,甚至是可以通用的。

表 10.1 遗传算法术语与生物学术语的对应与相互代用

遗传算法	生物学
第一代问题可能解	种群基因库
字符串(特定解)	染色体(基因组)
字符位	基因
字符串结构	基因型
字符串含义	表现型
字符串片段的互换	杂交中基因互换
字符位的改变	变异或突变
逼近最优解	进化

以上这个表所表现的术语的相似不是纯粹望文生义和隐喻性的类比,否则就只有文字修辞和形象表达的艺术功夫而无跨学科研究的学理实质。

用算法的科学来模拟遗传与进化之所以可能是因为它们之间有共同规律:复杂适应性原理。复杂适应系统科学的目的,就是寻找这个普遍的规律。

▷▷ 10.4.2 遗传算法的步骤

遗传算法的基本步骤是:

步骤1:随机生成 n 个长度为 m 的染色体串,又叫群体,即 n 个解决特定问题的试探解的集合。这些试探解由一个字符串来表达,当然其字符不限于四个码(如生物 DNA 的核苷酸那样),视解决问题的需要而定,不过通常用二进制数符表示,只有 1 与 0 两个字符。这个步骤称为形成初始染色体群 P 。 P 是名符其实的广义染色体。

步骤2:将适应函数或目标函数运用于染色体群中的每个染色体串中(即每个试探解中),求得它们各自的适应度的值。这个适应度的计算视不同的具体问题,有不同的标准和不同的算法,绕过了达尔文“最适者生存”

那个同义语反复难题。

步骤3:重复进行下列运算,以产生新的染色体群 P' ,其运算算子如下:

(a)选择:在染色体群中,随机选择两个染色体(试探解)以便进行繁殖。

(b)随意选择配对。

(c)运用交换算子。

(d)运用突变算子。

每实行(a)~(d)步骤后,将两个新一代染色体放入新群体中(这个新群体开始是空的),直至填满新群体,即 $P' = P$,从而代替原来的染色体群体,每次叠代,称为一世代。

步骤4:转向步骤2 进行第二世代运算,如此循环往复,直至实现终止条件[这些终止条件包括:指定进行的世代数完成,分配该计算任务的时间或经费用完,寻找到最优的、适应度最高的或满意的染色体(问题解),继续计算无甚改进等]。一般说来,遗传算法的应用需要叠代50—500个世代才能寻求出最后解。

以上是遗传算法的一般步骤,下面我们注意分析下列几个算子:

1. 选择:就是从染色体群体中选择“染色体”对进行繁殖复制。这里所谓“染色体”,指的是一个字符串,当字符串包括符号“#”时,起分类器的作用,它就是一个规则串,等等。

适应度愈大的字符串或规则被选中的概率越大,设有字符串或规则 R_i ,它的适应度为 $f(R_i)$,则它被选中复制或反复使用的概率为:

$$P(R_i) = f(R_i) / \sum_{i=1}^n f(R_i)$$

如何进行选择?当然最简单的办法是将原初群体中适应性较高的那50%选出进行复制,但这样做有一个问题,就是去掉了50%的基因库搜索空间。大家知道,即使适应性低的染色体中间也有一些基因是很优秀的。如残疾人霍金,总体是适应性较差,但他的脑子特别聪明,成为当代伟大的物理学家。所以不能轻率地去掉基因遗传的多样性,因此进行选择的最佳方法是依

上述适应度公式 $P(R_i) = f(R_i) / \sum_{i=1}^n f(R_i)$ 做成有 n 个不同扇形面积的轮盘,用轮盘赌的方法随机抽出两个染色体,若 $n=4$,4条染色体的适应度分别为

15%、25%、40% 和 20%，我们任选了四个数符串，做成下图的轮盘。

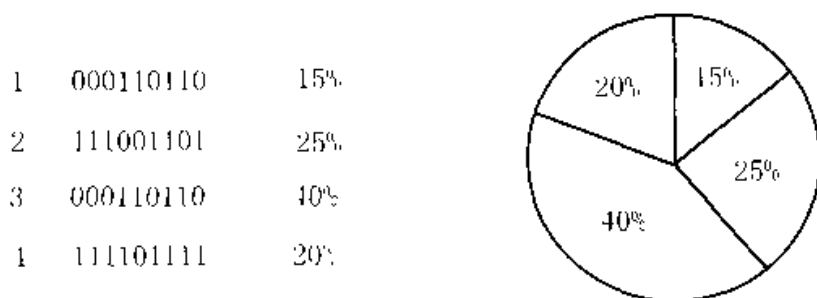


图 10.11 通过轮盘赌进行随机选择

摇动轮盘，随机选中二个进行匹配，于是所有的染色体都有机会入选。

其次是随意选择配对。这里所谓随意选择配对，意思是被选中的二条染色体父母代可以不经过交配直接进入新群体中，也可以经交换而让下一代进入新的染色体群体中。

2. 交换：字符串或规则的段落像染色体交配一样，可以通过交换其等位范围的段落而形成新的规则，例如图 10.12 中， R_1 与 R_2 通过从第 6 个数串点起进行交换形成 R_3, R_4 ：

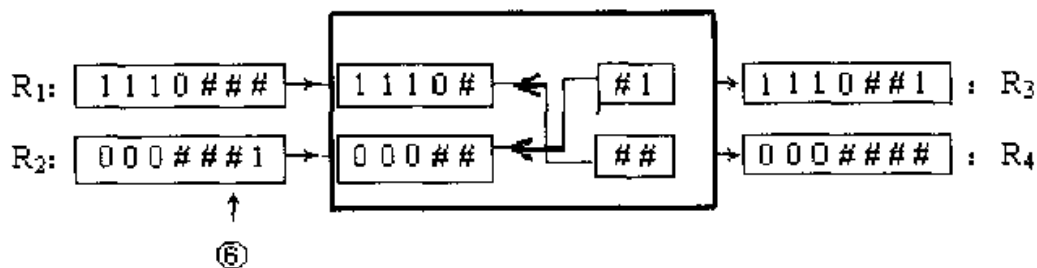


图 10.12 遗传算法中的交换运算

由 R_1, R_2 通过定点交换得出 R_3, R_4 。这可以称之为运用交换或交叉算子的结果。图 10.12 的遗传算法交换与图 10.10 中遗传学的染色体交换非常相似。这个交换运算总体上可以提高种群的适应度，这是一个生物学上的道理，也是一个进化算法上的道理。在生物学上是杂种更聪明、更体强力壮，而近亲繁殖或血缘通婚会导致整个群体的灭亡。这在复杂系统科学中叫做必要的多样性定律。

3. 突变：规则中有些位点发生突变，也会产生新的规则。例如 R_3 在第

1 位点上发生突变, R_4 在第 5 位点上发生突变, 就会产生新规则:

$$R'_3: \boxed{0110\#\#1}$$

$$R'_4: \boxed{000\#1\#\#}$$

从 R_3, R_4 到 R'_3, R'_4 的概率是很小的, 这个转换叫做施加一种突变算子的运算。

这些随机选择、交换、突变的规则被反复进行运用, 其目的是保证复杂适应原理中多样性变异原则的运用, 以及利用计算机的快速实现选择的快速, 使适应度强的广义染色体保留下来, 适应性弱的被淘汰, 从而实现了适应性的进化。

下面, 我们举一个简单的例子, 来说明遗传算法是怎样运作的。

假设我写了一句英文句子, 其长度包括空格在内共有 35 个字符, 使用的字母有英文字母 26 个, 加空格符共 27 个字母。我的句子很简单:

systems science is very interesting.

我不告诉你我写了什么句子, 也不告诉你我这一串字符有意义还是没有意义, 我要你猜猜我写了什么。你可以随机生成 500 个字符串, 每串有 35 个字符, 每个字符由 27 个字母任意选择一个组成。现在你已经完成了遗传算法的步骤 1。

我们现在要问, 如果我不再给出任何条件或算法, 由你任意地猜, 那么有多少可能的字符串? 显然有 27^{35} 个字符串, 它等于

125,236,737,537,878,753,441,860,054,533,045,969,266,612,127,846,243。

在这 27^{35} 个字符串中, 你每说一个, 我给你答案是还是否, 假定数到这个字符串数的天文数字的一半时, 你猜对了, 你要花多少个年头才能猜对呢? 早已超过宇宙年龄的许多倍了。经天文学家计算, 宇宙有 2^{80} 个电子, 宇宙年龄为 100 亿年, 设每一个电子每秒都做出了 3 亿次计算, 大约宇宙有生之年, 最后会做出一个正确的答案。所以此路不通, 还是有搞遗传算法的必要。

进入步骤 2: 现在你有 500 个字符串, 我按照这样的公式来求出你每一个字符串的适应度, 即你猜对了的字符数除以字符总数 (即 35), 这样你的 500 个随机字符串中每一串都被赋予适应度的值了。

进入步骤 3 和步骤 4, 按上面所说的选择、交换、突变的步骤一个世代

一个世代算下去,其中每代有 500 个字符串,75% 的交换率和 1% 的突变率,得出如下的计算表

表 10.2 从随机字符串进化到“systems science is very interesting”一语

世代	平均适应度	最佳适应度	最优字符串
0	0.035314	0.200000	pjsmmbyncksxie wetxfodkodjjzcsnpg
1	0.070000	0.257143	pjsmmbyncksxie nybyereqontliisxdt
⋮	⋮	⋮	
25	0.708686	0.771429	qysmcms science ns veryqintefestikg
26	0.724286	0.800000	qysmcms science ns veryqintefestikg
⋮	⋮	⋮	
36	0.806514	0.914286	uystems science ns veryqinteresting
37	0.820857	0.914286	qysmcms science is veryqinteresting
⋮	⋮	⋮	
41	0.895943	0.942857	uystems science ns very interesting
42	0.908457	0.971429	qystems science is very interesting
⋮	⋮	⋮	
45	0.927714	0.971429	qystems science is very interesting
46	0.936800	1.000000	systems science is very interesting

表 10.2 表明“systems science is very interesting”一语怎样从初始随机字符串中进化出来。这个运算只用了 46 个世代就达到了适应性最大,得出的最适字符串与目标值完全相符。

>> 10.4.3 遗传算法与复杂系统的适应性进化机制

本章讨论的问题是作为进化机制的适应性与选择问题。从复杂系统的环境对系统的作用的角度看,复杂适应系统的突现结构、功能是被选择的,是被变化着的环境施加的压力所选择的。这种选择作用,在 4.1.2 中被称为下向因果作用。而从复杂适应系统自身的角度来看,它之所以能够存在与发展,是由于它本身具有某种能被选择的适应性品质与因素。通过分类器系统(传递水桶算法)来模拟它的建模机制和学习机制,这是系统的一种后天获得性的机制。通过遗传算法来模拟它的交配、突变、复制和选择机制,这是系统的跨世代的种或类的被选择行为。为简单起见,我们称被这些进化算法(包括遗传算法与分类器系统算法等)所模拟的自然机制为适应

性被选择机制或适应性进化机制。对于这个机制有几点需要说明:

1. 适应性进化机制说明了复杂系统的结构、功能的突现,它的创新与变革性是怎样形成的,这些结构、组织、机体与功能是怎样朝着复杂性的方向发展的,从最简单的前生物化学进化,经过细胞与多细胞,一直进化到人脑。我们在前面各章中已经讲过,适应性机制使进化的系统倾向于增加多样性,倾向于多层次性,倾向于共生和聚集成群体,倾向于填满生态位(niches)。这就是适应性创造了复杂性、适应性创造了突现性的意思。

从新达尔文主义的观点看,突变的产生是盲目、自发的,有利的突变出现的概率是较小的,导致的变化也是不大的。因此,突现的物种的出现是缓慢的,而且是长期积累的结果。但快速计算机却能在几秒钟内模拟自然界几千万年的进化,所以突现的机制问题和突现的机制要通过多少时间才能实现的问题不能混为一谈。这使人想起了一百多年以前达尔文对威廉·佩利(William Paley)的反驳。佩利在二百年前《为设计做辩护》一文中写道:复杂的有组织的客体不能自发地突现出来,你如果在海边看到一只手表,你会假定它是由钟表匠制造的。但达尔文反驳道,佩利错了。复杂的有组织的客体能够突现:它由于进化而突现。虽然进化不能创造出一只表,但它能够创造出钟表匠,一个更加复杂更加漂亮的结果。适应性进化就是这个突现机制。

2. 适应性选择的单元是什么? R. 道金斯(Richard Dawkins)解释道,这个单元就是“DNA”,即“自私的基因”。他由此解释了生物世界的许多“利他主义”的现象:工蜂的蜇刺行为保卫了蜂群而牺牲了自己,鸟群中的警戒鸟发出高声暴露了自己却挽救了鸟群。这些都是同一基因群体的长期利益的自然设计。但自私的基因以及中心法则解释不了不同基因生物的共生与合作,更解释不了一个生态系统各个不同物种的复杂的平衡。这种平衡的信息,并没有记录在各物种的基因密码中,不能单用基因来进行解释。而整个地球,按照詹姆斯·罗夫洛克(James Lovelock)的盖亚假说(Gaia hypothesis),可以被看做是一个生命有机体。或用我们的话说,是一个最大型的复杂适应系统。因此,要对生物系统以及其他复杂适应系统进行解释,在适应性选择谱系的一端是基因,另一端是盖亚系统。这是还原主义与整体主义的两极的互补。适应性选择机制正是要对还原论与整体论进行连续统式的综合。复杂适应系统的计算机模拟正是这种综合的一种表现。先天的

遗传和后天的学习,以及与此相应的遗传算法与传递水桶算法的共同使用,正好是进化算法的两极的综合。

3. 遗传算法与分类器系统算法是自然界复杂适应系统的遗传与学习的模拟。这种模拟之所以能如此有效地解决工程问题、计算机程序问题以及各种管理系统的问题,说明所有自然界和人工系统中有共同的规律:适应性进化规律。从这个一般规律出发,说进化算法模拟了自然界,是一种仿生学,如同说生物进化模拟了或模仿了自然的数学结构一样正确。海森堡在讨论物质结构时说过一段话,似乎有助于我们理解复杂系统的适应性进化原理及其形式表达的性质。他说:“事态可以这样来概括:所有基本粒子都是由同样的材料——即能量所构成。它们具有种种形式,而这些形式也正是能量为变成物质所必须采取的形式。这里我们又一次遇到了一对古老的概念,即内容与形式或质料与形式,它们是亚里士多德的哲学所留给我们的。能量不仅是使万物保持运动的力,而且像赫拉克利特的哲学中的火一样,是构成世界的基本材料。物质之所以存在,是由于能量采取了基本粒子的形式。我们现在知道,有不下于二十五种不同种类的亚原子粒子,而我们有充分根据可以设想,所有这些形式都是仿照基本的数学结构构成的。所以它们都是一种基本规律的结果。这种基本规律可以用数学语言来表述,而且亚原子粒子能合乎逻辑地从中产生出来,正如氢原子的不同能态可以从薛定谔微分方程中演绎出来一样。”^①当然,复杂系统的研究还处于一个幼年时期,我们还没有找到适应性进化的薛定谔方程。但是这个适应性进化机制或适应性进化机理的性质却和薛定谔方程的性质是一样的。

10.5 复杂系统的适应性受约束生成过程

本节的目的是运用第3章以及其他章节中关于系统概念的相关知识建立一个系统数学模型,来说明复杂系统及其突现的生成过程的基本规律。首先,我们要转换一个角度,重提下面的几个概念:

① W. 海森堡:《严密自然科学基础近年来的变化》,《海森堡论文选》翻译组译,上海译文出版社1978年版,第182页。

1. 行动主体。例如蚁群中的蚂蚁、神经网络的神经元。在前面各章中我们分析了自主行动主体、自利行动主体、适应性行动主体。它们各有其特点,撇开这些特点不谈,我们并不太强调它的自主性;但从关系的观点来看,从组成一个整体的系统来看,霍兰称它为“机构”(mechanism),强调它是受到规律的约束、组成复杂系统的元素。从动态的观点看,则需要用状态 S 来描述(见 3.3.1)。

2. 转换函数。主体间(或机构间)的相互作用,从相互作用网络的观点看,要用输入与输出的对应关系来表示(见 3.2.2)。一个行动主体(机构)在整体中的作用就是将输入转换为输出的功能,所以它本身就是一个转换函数。所以霍兰说得很对:“在符号混用的情况下,符号 f 除了用来表示机构外,还用来表示转换函数。”^①

3. 规则,又称为生成器(generator)。它是决定或组成转换函数的东西。转换函数就是由一组相对简单的规则组成的。霍兰说:“转换函数,就是规则的形式表达。”^②整个复杂系统及其突现生成过程的关键就是由少数几条简单的规则支配的主体机件在其大量的相互作用和反复叠代中产生出巨大的复杂性和突现性、不可预测的新颖性和不可还原的整体性的过程。

有了这几个术语,我们在 9.3.2 所说的“自组织是一个由组成元素的局域相互作用进展到全局的组织秩序”就有了一个精确的数学表达的可能了。其中依一定规律发生作用便由一个转换函数来表达,几个不同主体的相互作用便由一个复合函数来说明。这里要特别提醒大家注意我们在第 3 章说过的,约束是关系的同义语,是规律的同义语。

以下是复杂系统突现的受约束生成过程的精确描述。

首先来描述行动主体的状态 S :

$S = \{S_1, S_2, \dots\}$ 这里假定 S_i 是有限的, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 n 为有限数。每个下标表示主体(机构)的一种可能状态。

其次来描述行动主体(机构)的转换函数 f 。刚才说到这里 f 既被看做是转换函数,又被看做是行动主体或机构本身。因为在数学家的眼光中,从功能主义(见 5.3)观点看,行为主体本身就是一个函数。 f 的定义是:

^① John H. Holland, *Emergence*, Oxford University Press, 1998, p. 132.

^② *ibid.*

$$f: I \times S \rightarrow S \quad \dots\dots\dots (10.1)$$

f 作为函数,是以现时的输入和状态为自变量的函数。其值域当然也是机构的状态。这不过是机构 f 由上一个状态来生成下一个状态而已。这个生成是按规律的生成、受约束的生成

这里 I 有许多可能的输入,即 $I = \{I_1, I_2 \dots I_j, \dots I_k\}$; 而每一个输入又有许多可能的状态值,即 $I_j = \{i_{j1}, i_{j2}, \dots i_{jh}, \dots\}$, i_{jh} 就是第 j 个输入的第 h 个可能状态值。如果利用 f 的定义展开 I , 就有下列的转换函数的展开表达式, 即:

$$f: (I_1 \times I_2 \times \dots \times I_k) \times S \rightarrow S \quad \dots\dots\dots (10.2)$$

请注意, f, I, S 这些变量或函数,都是时间 t 的函数,于是引入时步表达 $t, t+1, t+2 \dots$ 便有

$$S(t+1) = f(I_1(t), I_2(t), \dots, I_k(t+1), S(t)) \quad \dots\dots\dots (10.3)$$

也可写成 $S = f(I, t)$ 。

反复使用函数 f , 就得出 3.3.2 中所说的系统状态变化及其在可能空间中的轨线。转换函数及其中包含的规则,将可能状态、可能空间约束成为一条现实世界的轨线。机构就这样突现了自己的历史、复杂的历史。

我们刚才讲过,复杂性和突现来自主体机构之间的相互作用。因此,要表达复杂系统及其突现的形成过程,就要模拟与表达主体机件间的相互作用过程,这个模拟过程首先要从主体机构的集合 F 中选出初始因子(primitives)集,然后将初始因子集彼此组成网络。当第一个主体机构的状态序列决定第二个机构输入的序列值时,我们就称一个机构连接到另一个机构了。一旦这些初始因子这样形成网络,我们就说,我们已获得了一个受约束的生成过程

令初始因子或基本机构 $F = \{f_1, f_2, \dots f_i \dots f_m\}$ 。

每个主体机构 f_i 的传输函数为:

$$f_i: I_i \times S_i \rightarrow S_i \quad \dots\dots\dots (10.4)$$

其中 $I_i = I_{i1} \times I_{i2} \times \dots \times I_{ik(h)}$, $k(h)$ 为输入到主体机构 i 的输入个数。

为了定义两个机构之间的连接,一个机构的状态决定另一个机构的输入,我们需要定义一个界面函数(interface function)

$$g_j: S \rightarrow I_j \quad \dots\dots\dots (10.5)$$

这里 g_{ij} 为决定由 j 输入到机构 i 的输入值的函数, 这个函数的自变量是 j , 其定义域是比较广的, 即 F 机制的所有状态集 $S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_m$ 。

这样决定由 j 输入到 i 的分界的函数就可写成:

$$I_{ij}(t) = g_{ij}(S_h(t)) \dots\dots\dots (10.6)$$

这就是主体机构 h , 在时刻 t , 由它的状态 $S_h(t)$, 通过界面函数 g 确定输入 j 从而与机件 i 联系起来, 这便是一个由两个机构连接起来的受约束生成过程。它是一个复合函数。由此递进推而广之, 就会有許多行动主体相互作用、相互连接, 成为可以用函数表达的各种可能的受约束生成过程。

现在每一个机构主体的行为输出被另一个机构主体转换函数所决定了。这个受约束生成过程是不是没有自由而只有约束呢? 不! 如果有一些输入到机构 i 的 j 是没有与其他机构相联系的, 这个输入是自由的。那些决定受约束生成的初始条件不受其他机构规定, 它也是自由的因素。况且转换函数 f 如果是概率函数, 它也包含了随机的因素。这就为受约束生成的随机性、分叉和对初始条件的敏感性留下了余地。

我们在第7章和第9章讨论过的元胞自动机, 完全可以作为受约束生成这个复杂性突现原理的最好例证。例如, 二维的元胞自动机, 每一个方格(元胞)就是一个机件。它的“黑”或“白”、“0”或“1”, 就是它的状态。本书7.5.5所述的元胞状态转换的四条行为规则就是它的转换函数, 有了这个简单的机件和简单的转换函数, 再加上初始条件的自由输入, 只要有一定数量的方格(机件数), 它们依简单规则约束的相互作用、状态转变, 就能产生出不可穷尽的复杂系统和突现性质; 生命滑翔机、滑翔机枪、蚂蚁修筑公路、完成通用计算机所能完成的一切计算功能都可以突现出来, 它们都是由一定数量的元胞受规律约束而生成的结果。

上面所讨论的, 只是复杂系统的突现的生成过程, 例如元胞自动机中滑翔机或滑翔机枪的生成过程, 一个蚂蚁群的生成过程, 一个市场的生成过程或一个有中央控制的组织。例如一个有神经系统的多细胞生物的生成过程, 对于这个生成过程, 我们可以做下面的比较精确的函数式的表达。按照上面的符号, 它就是: $I_{ij}(t) = g_{ij}(S_h(t))$, 其中 $S_h = f_h(I_h, t)$ 。这就是将三个主体机构 h, j, i 联系起来, 即用有向图 $h \rightarrow j \rightarrow i$ 表示的受约束生成的表达式。但是在这里只表达了 h, j, i 三个主体机构的自组织、自然界和人工世界中, 有许多复杂系统经自组织突现出来, 就像我们在水桶算法中看到许

多规则串、在遗传算法中看到许许多多经交换和突变的“染色体”以及在神经网络中许多不同权重的突触联结网一样。本章的主要目的就是要介绍和讨论对这些自组织突现体进行适应性的选择。水桶算法、遗传算法和反向传递算法的模拟,就是要对这个受约束生成的结果进行一个最优的选择。我们可以参照上节所讲述的反向传递算法,给受约束生成过程补充一个普适性的适应性选择的算子 ∇_B 。它主要是由系统环境施加的,对它的研究将可能是复杂适应系统理论研究的核心问题之一。(对它的探索很显然超出了这本导论教材的范围。)这样我们便有了一个复杂系统的适应性受约束生成过程 PAC 的一般表达式,它就是:

$$P_{AC} = \nabla_B g_{ij}(S_b(t))$$

其中 $S_b = f(I_b, t)$ 。这里 P_{AC} 表示 Adaptive Constrained Generating Procedures, 是适应性受约束生成过程的意思, 其中的约束机制, 包括行动主体、转换函数和规则集, 都是可变的, 并且是适应性进行变化的, 就像本章中所讨论的那样。

第五编
复杂系统管理论

第 11 章

复杂系统管理思想

我们在 5.3.2 和 5.4.1 中已经谈到了关于组织与管理的某些系统思想和系统方法。本章将要系统地论证这些问题。人类要生存和发展,一开始就需要面对严峻的自然环境以谋取必要的物质生存资料,它的进一步的发展就是要满足人们的经济的、社会的和政治的需求。为此就必须组织起来,进行协同合作与联合联盟。这种协同作用的制度形式就是组织,对各个个人的目标的整合便是组织的共同目标。在现代,家庭、企业、公司、社团、政府、教会、大学等等都是达到特定目标的组织。有了组织就需要管理。所谓管理,是这样一种活动,它行使和发挥某种功能,以便有效地获得、分配和利用组织成员的努力和物质资源来实现某种共同的目标。随着数学、自然科学和社会科学的发展,组织与管理成为科学的研究对象,发展了它的各种理论。特别是第二次世界大战前后,随着组织与管理的复杂化,便建立和发展了科学地、合理地调度人力、物力资源,最优化地达到目标的运筹学,并在此基础上又发展了系统分析和系统工程。这些管理学科作为系统运动的一个组成部分,成了系统科学的理论来源之一,反过来又成为系统科学理论在实践中的具体运用。而当系统科学——包括控制论和复杂性理论——发展起来之后,系统科学家又运用系统的思想和观念去解释和阐明组织和管理科学的各种问题。开始只是用负反馈的思想和信息流的概念来说明硬系统管理方法的合理性和达到有明确定义的目标的基本途径和选择。后来,组织控制论的创始人斯塔福·贝尔(Stafford Beer)提出了活系统理论(Viable Systems Model),从根本上探讨了组织管理的一些重要原理。特别是到了现代阶段,由于复杂性科学的兴起,为组织与管理科学提供了一种新的思维,对组织与管理科学的发展有着重要的启示。本章的目的是要提供一个平台,在组织管理理论和复杂系统理论之间进行跨学科的对话。本章着重

讨论下列三个问题:(1)当代组织管理理论中的系统思想。(2)活系统理论模型及其组织控制论观点。(3)复杂性组织管理。

11.1 当代组织管理理论中的系统思想

从组织管理中的系统思想形成的角度看,在当代组织与管理理论中,有几个重要的发展阶段或发展线索特别值得我们加以研究。这就是理性模型、人际关系模型和系统模型。

11.1.1 组织的理性模型

组织的理性模型包括三个基本部分,分别在三本书中得到了表达:弗·泰罗(F. Taylor)的《科学管理》,亨利·法约尔(Henri Fayol)的《行政管理理论》和马克斯·韦伯(M. Weber)的《科层理论》。这些理论基本上都是在20世纪初期提出来的,当时工业的急促发展迫切需要劳动力,文化素质较低的大量农民工和外地劳工涌进企业,企业和其他组织中出现了某种混乱现象,于是科学管理和组织的理性模型便应运而生。科学的和理性的管理这个概念,指不是单凭企业和公司经理的个人经验进行管理,而是经过对组织和生产过程进行科学研究而进行的管理。“理性”一词,在这里不是指的“价值理性”,而是指的“工具理性”,即以提高功利和效率为中心而进行的管理。

这里首先和重点介绍泰罗的科学管理。它的要点是:

1. 管理工作的第一项任务就是对工人的劳动与工作进行动作与工时及其关系的研究,搜集、分类、整理他们的工作方法,研究出完成工作任务的最有效率的方法,即科学的工作方法,并加以标准化和制订定额。泰罗说,这种研究就像老教练要研究棒球队员哪一种动作是最合理的,然后加以标准化并进行推广一样。

2. 按照这一套标准化的工作方法,选择、教导和培训工人。取消工人对其工作任务的计划、组织与控制的自决权,将它交由管理者去做。工人必须准确地按管理专家所吩咐的去做。

3. 建立劳动奖励制度。给达到“科学标准”的雇员或头等工人以

125%的工资,未达标的工人只获得80%的工资。

4. 明确规定管理人员的职责,对管理人员与工人的工作明确进行分工,并密切进行合作。

泰罗十分重视管理工作的巨大作用。他说:“只有通过强制性的标准化方法,强制采用最好的工具和工作条件,强制性合作,才能保证快速工作。而强行采用标准和强行合作的责任只能落在管理者身上。……管理者必须认识的广泛事实是,如果工人不能从这种做法中获得额外的报酬,他们是不会顺从于这种更为死板的标准的,他们也不会额外勤奋地工作。”泰罗对科学管理能解决劳资纠纷也十分乐观。他说:“通过最大限度地提高每个工人的生产效率,科学管理为劳资双方赚取最大的收益。因此,一切劳资之间的矛盾与冲突均由科学管理所解决。”^①

马克思指出:“大工业的原则是,首先不管人的手怎样,把每一个生产过程本身分解成各个构成要素,从而创立了工艺学这门完全现代的科学”,同时也使工人成为“社会局部职能的局部个人”。^②泰罗的科学管理在强调组织管理如何能够达到提高劳动生产率的同时,将工人及其劳动看做“机器的一个组成部分”,是“机器上加满了油的齿轮”,这是一种机械的系统观。从今天的后见之明来看,是违反“工业人道主义的”。马克思和列宁都曾批评这类管理制度是残酷地榨取工人的剩余价值的“血汗制度”。这种批评显然是有道理的,因为这种提高劳动生产率所得来的收益,当时大部分是落到了资本家手里。

法约尔是行政管理理论的创始人。他将管理过程定义为“预见与计划、组织、指挥、协调和控制”等五个环节。一直到今天这五个环节都还是研究管理过程的基础。他详细解说了要用企业和组织的、健全和有序运作的14项原则来指导管理实践。这当中最重要的是:(1)专业化的劳动分工。(2)权威的重要性,认为职权就是发号施令的权利和使人完全服从的权力。(3)等级链,它是从最高权威到最低人员的等级秩序。(4)统一指挥,即雇员只应接受一个上级的指令,对于具有共同目标的一组活动只应有

① 转引自弗里蒙特·E. 卡斯特、詹姆斯·E. 罗森茨韦克著《组织与管理——系统方法与权变方法》,李柱流等译,中国社会科学出版社1989年版,第68—69页。

② 马克思:《资本论》,人民出版社2004年1月第2版,第559、561页。

一个首脑,一个计划。这种行政管理理念强调的是权威主义的集中领导和多层级的控制系统。不过他强调的并不是一种个人决定的权力,而是“一定数量的不偏不倚的原则、法则和规章”,带有某种社会契约的性质,并规定某种灵活性、平等、个人主动性作为制衡的因素。

马克斯·韦伯作为现代社会学的奠基人,十分强调一组价值与规范对于组织形成的作用。他对于组织的管理提出了科层模型(bureaucracy model,直译为官僚机构模型)。不过这个概念并不是指那种滥用职权、文牍主义和低效率的意思。相反,它指的是一种复杂组织的有效率的形式。它包含的内容主要有:(1)组织要有一种劳动或工作的专业分工。(2)组织工作人员有明确规定的合理合法的职权。所谓“职”就是他们在组织中的角色或地位,“权”就是根据他的地位行使合理合法的权力,有关人员必须服从这种权力。这是一种合法职位权威论。(3)职位在组织中形成等级制度。(4)存在着—组规章与制度,组织靠它来管理个人关系,这是非人格化的。它不是讲人情的,而是讲规章制度的。

将组织的理性模型的三个部分总合起来,我们可以看出它的一般特征。组织被看做是达到设置它和控制它的人们的目的的工具,而不是协同一致、贡献与回报相平衡的社会结构;它是由相互独立的部分根据管理原则以达到效率最大化的方式组成的技术经济系统,而不是社会共同体组织。决策因为旨在达到效用的最大化而被认为是理性的。控制是按照规章和严格的权威等级来实行的,而不是既有权威又有民主。信息根据任务安排来处理并按层级向上报告,决策一级一级下达并加以执行,而不是强调人际沟通对话。这种古典的管理理论主要有两个局限:(1)它是以效率为中心、而不是以人为中心的,西蒙批评它是“机器型”的系统。W. G. 本尼斯批评它是“没有人的组织”。^① (2)它对组织使用了一种非现实的封闭系统观点,没有考虑环境因素和很多重要内部问题对组织的影响。我们将会看到这两个缺点会在以后发展起来的组织与管理理论中得到逐步的解决。

▷▷ 11.1.2 人际关系模型

随着社会经济与文化的发展,人们生活水平与文化素质的提高,社会上

^① 弗里蒙特·E. 卡斯特:《组织与管理》,李柱流等译,中国社会科学出版社1985年版,第86页。

开始了“工业人道主义”的运动,即对组织中人的基本关心,这正如 W. G. 斯科特在《组织理论》一书中所说的:“对工作环境进行设计,以恢复人的尊严,是工业人道主义的基本”。^① 这就是人际关系模型的核心。人际关系模型主要是 20 世纪 40 年代以后一批行为科学家创立的。行为科学的研究对象是人的行为,它的重点学科是心理学、社会学和伦理学。人际关系模型的最重要的实证研究是由哈佛大学伊尔茨·梅奥教授及其同事在美国国家研究委员会协助下、在西方电气公司霍桑工厂进行的工业心理学、工业社会学的研究,其结果是于 1945 年出版了梅奥所著的《工业文明的社会问题》一书。以这本书为代表,人际关系模型可以归结为下列 6 个论点:

1. 企业组织不仅是个技术经济系统,而且是个社会系统,将企业和社会组织看做是由经济人组成的是不恰当的。这个社会系统明确规定个人的作用,并确立各种可能与正式组织标准相矛盾的标准,以起到某种制衡的作用。

2. 个人不仅受经济奖励的激励,而且受各种不同的社会和心理因素的激励,人的行为受情感、情绪与态度的影响。

3. 非正式工作群体是重要单位,扮演着对它的成员进行控制的角色,对工人的态度和工作起着重要的作用。

4. 为了能考虑和涵盖各种社会心理因素,应对传统观念中以组织为正式结构和职位为基础的领导模式做实质性的修正。应该强调民主的而不是独裁的领导模式。权威取决于下属的信服与遵从,而不是上级的地位。

5. 人际关系学派赞同马斯洛的人的需要层次论。认为人的需要除了生理需要外,还包括安全、爱情、感情与归属、自尊和自我实现的需要,共有五个需要层次。因而工人的满足感与生产率有联系,不断增加工人的满足感可以提高工作效率,要为职工创造自我实现的环境。

6. 重要的是,在组织等级中各级层次之间建立有效的沟通渠道,以交换信息。这样,工人“参与管理”就成了人际关系运动的重要方面。

总而言之,人际关系模型认为,人及其需要的满足应是组织分析的中心。领导的管理是以雇员为中心,而不是以生产为中心的,是靠民主管理,

^① 转引自弗里蒙特·E. 卡斯特等著《组织与管理》,李柱流等译,中国社会科学出版社 1985 年版,第 94 页。

而不是靠权威管理的,对人际关系的关怀比等级关系更重要。分派工作应允许其执行者有更多的自主权,决策要允许工人有较大的参与力。领导和控制的策略是要更多鼓励成员自己监督自己,而不是由领导人来指导一切、控制一切。我们在本章第2节中将会看到,活系统理论的组织控制论正是从系统理论上导出人际关系模型、并在实践上得出同样的结论。

▷▷ 11.2.3 系统模型

随着跨学科研究的发展,随着系统科学的思想与方法在生命科学、生态科学、社会学和心理学中的影响越来越大,在组织理论和管理理论中出现了一个新的学派:组织管理科学的系统学派。它的先驱者一般被认为是切斯特·巴纳德(Chester Barnard)。^①他认为,组织指的是包含着能互相进行信息联系并愿意为了自觉的共同目的而贡献活动的人们的任何一种协作组织。这个学派后来为H. 西蒙,T. 帕森斯等人在20世纪50年代和60年代加以发展。西蒙说:“‘系统’这个术语越来越多地被用来指那种特别适于解决复杂组织问题的科学分析方法”,“组织是决策过程的复杂系统”。^②而帕森斯,我们在5.3.2已经讲过,他是社会系统论的创始人。从20世纪70年代至今,这个学派又发展了各种组织的系统理论模型。它特别强调,组织是复杂系统,强调组织的自觉的目的性和协作性,组织的整体性及达到目标的协调一致性,组织的开放性及其对环境的适应性。这些特点在许多地方优于理性模型和人际关系模型,并吸取了它们的优点,扬弃了它们的缺点。关于组织与管理的系统模型,有下列三个要点需要加以说明:

1. 组织的开放性

无论理性模型还是人际关系模型,它们的一个共同弱点就是过分强调组织与管理的某个侧面或某些子系统的作用。例如理性模型过分强调组织是个技术——经济的最大效用系统,而人际关系模型过分强调组织的社会心理方面,把它们多少看做是一个封闭系统,而忽略经济、政治和其他环境的方面。系统模型首先注意组织与管理的开放性。C. 皮罗在《组织理论的

① Chester Barnard. *The Functions of the Executive*. Cambridge: Harvard University. 1938. in *Selected Writings on Management*. 中国对外翻译出版公司1988年版。

② H. 西蒙:《管理理论入门》,1964,参见F. E. 卡斯特等著《组织与管理》,李柱流等译,中国社会科学出版社1985年版,第128页。

简短而光辉的历史》一文中指出：“但所有不同的组织分析学派现在似乎全都同意的一件事情是：组织是系统——确实，组织是开放系统。”^①组织必须在复杂的内部环境和外部环境中持续生存和继续发展，它必须从环境中获得足够的资源（物质、能量、人力）和信息的输入，经过组织自身的运作，使之转变为向环境提供的适当的资源和信息的供应。这就是我们在前面各章所论述的开放系统适应性自稳定、适应性自组织和适应性进化发展原理。例如企业组织要生存和发展，必须接受人力、材料、资金和信息形式的投入，企业组织将这些投入转换成为产品、劳务和足以使组织成员继续保持在组织中的报酬与奖励，并在特定的社会文化条件下达到职工贡献与回报的动态平衡。它的一般模式是：

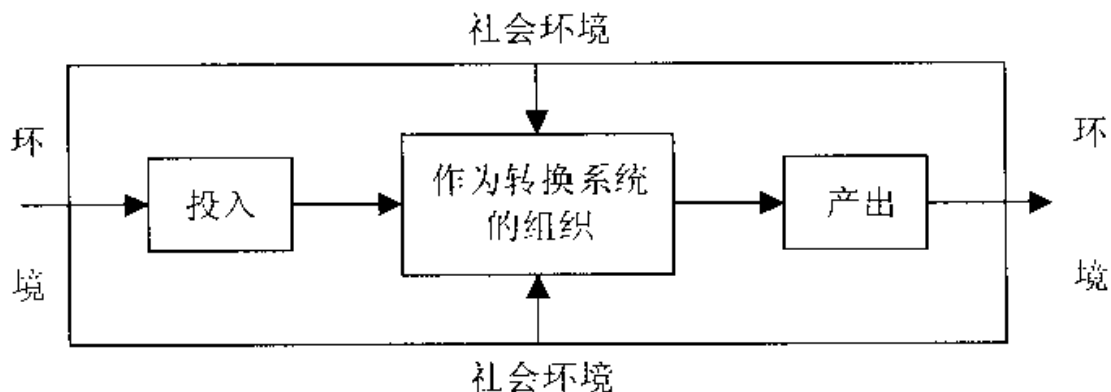


图 11.1 作为开放系统的组织

系统组织与管理学派十分重视组织的这种开放性。我们在 5.3.2 中讲到，社会系统论的创始人同时又是组织与管理学派的积极支持者帕森斯将系统与组织的基本功能划分为适应——达标——整合——维模四项。其中为首的功能——适应，就是要处理组织的开放性问题。而维模本身是要调整组织中个人与组织的关系，是要处理子系统之间的协调、适应问题。在缩小了的尺度上看也是一个子系统与社会环境的关系问题。还应指出的是，组织与管理的系统模型有一个权变的观点，即认为任何组织都面临内部环境和外部环境变化多端的情况。管理的主要任务就是要适应这种变化多端

① C. 皮罗：《组织理论的简短而光辉的历史》，转引自 F. E. 卡斯特等著《组织与管理》，李柱流等译，中国社会科学出版社 1985 年版，第 131 页。

的环境。系统管理学家 F. E. 卡斯特和 J. E. 罗森茨韦克指出:“系统观点认为,管理部门所面临的是一种动态的、固有的不确定性和常常是模棱两可的情况。正如传统理论所认为的那样,管理不能完全控制生产的所有因素,它将受许多环境力量和内部力量的很大限制;然而这并不意味着管理是被动的,只能适应这些限制条件。正相反,管理在认识和确定环境的关系、设计内部各分系统中,具有一种积极的作用。管理的主要职能之一,是建立组织与环境的和谐关系……系统方法可为人们理解组织提供重要的哲理基础。”他们又引用权变专家们的论述,指出:“运用权变观念的人必须认识其组织有更多和不同的目标和需要;必须研究与决策有关的更多因素;必须运用各种各样的制定和执行决策的方法;必须不是逐个地,而是在相互关系的基础上评价决策。因此,实际工作者必须认识到,如果他们选用权变观念,他们就必须学会新的方法来解决组织的各种问题。”^①关于这个问题,4.4.3 已讨论到的艾什比的必要多样性定律即有所解决,下一节(11.2)将要讨论到的活系统模型将进一步从管理学上探讨解决之道。

2. 组织的整体性

依据 F. E. 卡斯特和 J. E. 罗森茨韦克的研究,组织是一个开放性的社会的和技术的系统。它是由下列五个子系统组成的整体(参见图 11.2)。

(1)组织的目标和价值子系统。社会组织与物理系统和生物系统都不同,它是人为地设计的。因此组织的目标和价值体系便是组织的第一个重要子系统。其中价值观来自较为广泛的社会文化环境,其目标并不是任意设计的,而是根据更为广泛的系统的社会需要或要求来决定的。例如,大学的目标就是根据社会对知识传播和知识创新、文化发展的需要来制定的。它只有满足这种社会需要,实现它的社会功能,才能有正常的输入、转换和输出的运作。对于大学来说就是有正常的资源、生源(学生来源)的输入,教学科研的运转和人才与知识的输出。

(2)组织的技术与业务子系统,它指的是完成组织目标所需要的知识与技能,包括输入转换为输出所运用的各种技术,并包括实现这些技术的条件。它取决于所要完成的任务,一个制造工厂所需要的知识、设备与技能所

^① F. E. 卡斯特等:《组织与管理》,李柱流等译,中国社会科学出版社 1985 年版,第 139、143 页。

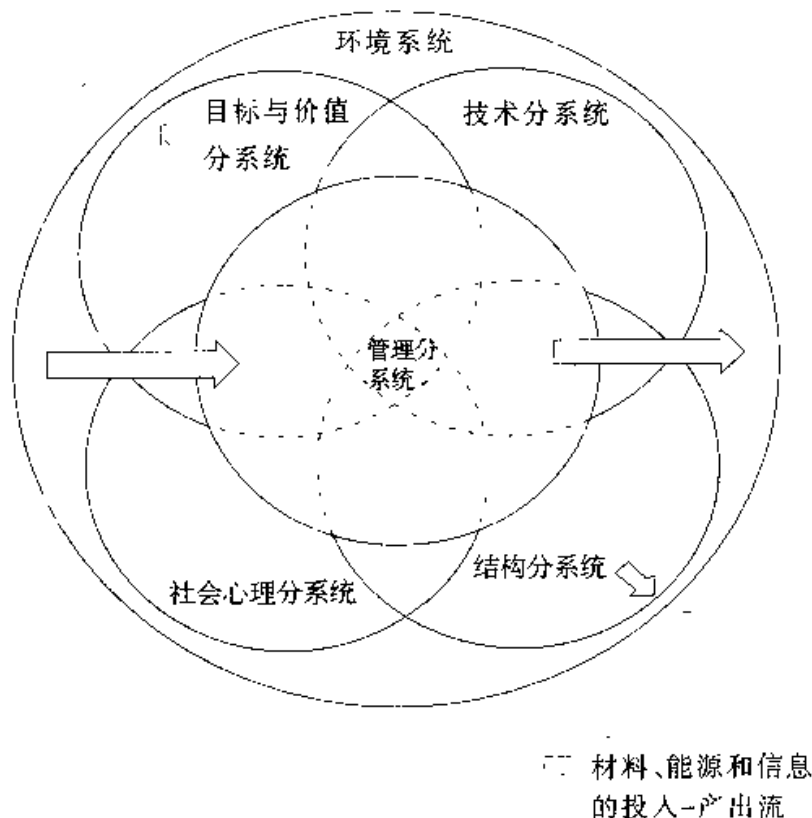


图 11.2 组织的五个子系统

组成的技术系统与大学由教授讲师的知识才能、教学科研设备、图书馆资料设备等所组成的技术系统或专业系统是不相同的。

(3) 组织的社会心理子系统。它由相互作用的个人与群体所组成,包括个人之间的行为与动机、地位与作用的相互关系。个人的思想感情、价值观、态度、期待与愿望、外部环境的作用、内部人际关系以及组织结构都给社会心理系统以很强烈的影响,形成一种“组织气氛”。如公司的“企业文化”、大学的“学术风气”,这些就是组织的社会心理子系统的很重要的表现。

(4) 组织的权力结构子系统,或简称为组织结构。结构可以通过组织图、职位关系表以及规范程序表现出来。例如,部队的权力与服从关系是比较集中和比较严格的,而大学中无论教师、学生或职员其权力关系是比较分散的,自主性更强。

(5) 组织的管理子系统。这个子系统用以完成 11.1.1 中法约尔所说的制定目标、计划、组织、指挥、协调和控制的任务,保证系统健全而有序地

运作。

将组织划分为五个子系统,并在图 11.2 中将它们的关系以及它们与环境的关系展示出来,有助于理解组织理论的演变和阐明其中的系统思想。组织与管理的理性模型强调组织中的权力结构子系统,并强调技术系统中决策的制度化 and 效率化。而人际关系模型则强调社会心理子系统,强调需要层次、激励、人道、人际关系的重要性。各学派侧重特定的子系统而忽视其他子系统的重要性,并特别忽视了组织对环境的适应性。系统模型将组织的各个子系统看做是执行组织的不同功能的有机组成部分,它们相互依存着并与环境相互作用着。

但是,要设计这样一个组织结构,使它既保持高度的效率,又有良好的和谐的人际关系和民主管管理而不依靠权威与服从的等级制度,这是可能的吗?下一节将会告诉我们,这是可能的,而且这种模型已经有了,这就是贝尔(Stafford Beer)在 20 世纪 70 年代建立、80 年代发展起来的活系统模型。一直到现在还有许多管理学家和系统学家在精心地研究它和发展它。

11.2 活系统模型及其组织控制观

活系统模型(The Viable System Model)是 S. 贝尔(1926—2002)在 20 世纪 50 年代运用控制论原理、数学、工业与行政管理的运筹学和社会学原理建立的。当时他在美国一家钢铁厂做经理人员,对传统的管理制度深感不满,试图运用控制论来解决管理问题。他思考一个问题:组织管理与具有大脑的有机体有什么共同的东西,一个系统是怎样能够成为活的,即“有独立存在的能力”,支持着系统生存与活动的规律是什么?他写信给控制论创始人维纳,维纳回信说,“到麻省理工学院来吧”。1959 年他写了《控制论与管理学》一书,1972 年又写了《企业的大脑》一书,由此建立了活系统模型。1979 年发表了《企业的心脏》,对活系统模型进行了详细的控制论论证。1985 年他又写了《组织系统的诊断》一书,以“手册”或“经理指南”的形式指导如何发现和解决企业和组织中存在的问题,改进组织性能,使活系统模型在小型组织、大型企业、地方政府与国家政府的研究中得到广泛的应用。贝尔本人毫不犹豫地不断研究、推广和运用活系统理论。运用这个理

论,他先后40年在22个国家担任过公司、社会服务机构、整个国家乃至国际社会的顾问。受他指导的公司和单位效率增长30%—60%。



S. 贝尔 (1926—2002)

1971年,他应智利总统 S. 阿连德(President Salvador Allende)的邀请,运用活系统理论研究了该国的整个社会经济系统。他将75%的智利经济整合到一个统一的信息系统中,从而大大提高了该国的经济效率。这个成果以增加4章的形式发表在《企业的心脏》的新版本(1988)中。他在英国、美国和加拿大都当过多年的教授。管理学界和系统科学学界对他的活系统理论评价很高。英国系统科学家 R. 福罗特说过:“贝尔成功地构造了一个控制论模型,它能整合组织理论的基本发现。”^①国际系统科学学会主席 M. C. 杰克逊说过:“活系统模型将过去约50年里在组织理论科学中发现的成果融为一体。”“少许活系统模型的知识可以给管理者很大的帮助。而且它可能为他们节省许多时间——不必再读组织理论的书籍;它就是全部。”^②

▷▷ 11.2.1 活系统的研究方法论

复杂系统是怎样能够存活的,背后有—些什么样的规则或规律使它能

① R. L. Flood & E. R. Carson: *Dealing With Complexity*. Plenum Press, 1993, p. 81.

② 迈克尔·C. 杰克逊:《系统思考》,高飞,李萌译,中国人民大学出版社2005年版,第104,106页。

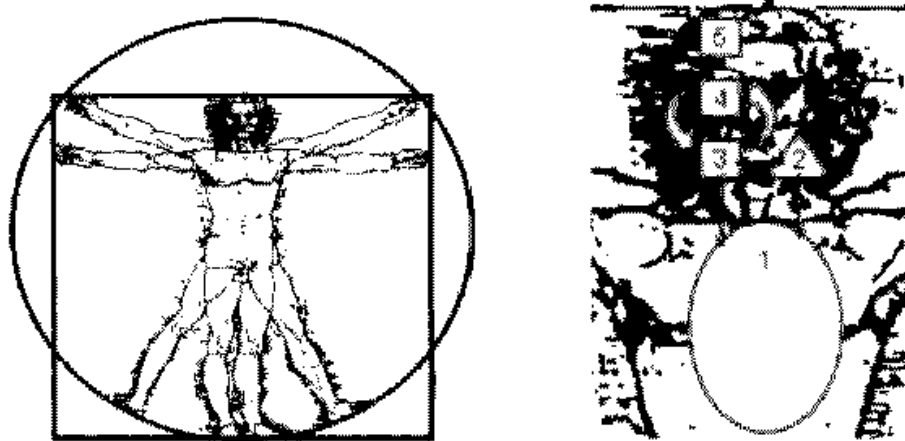
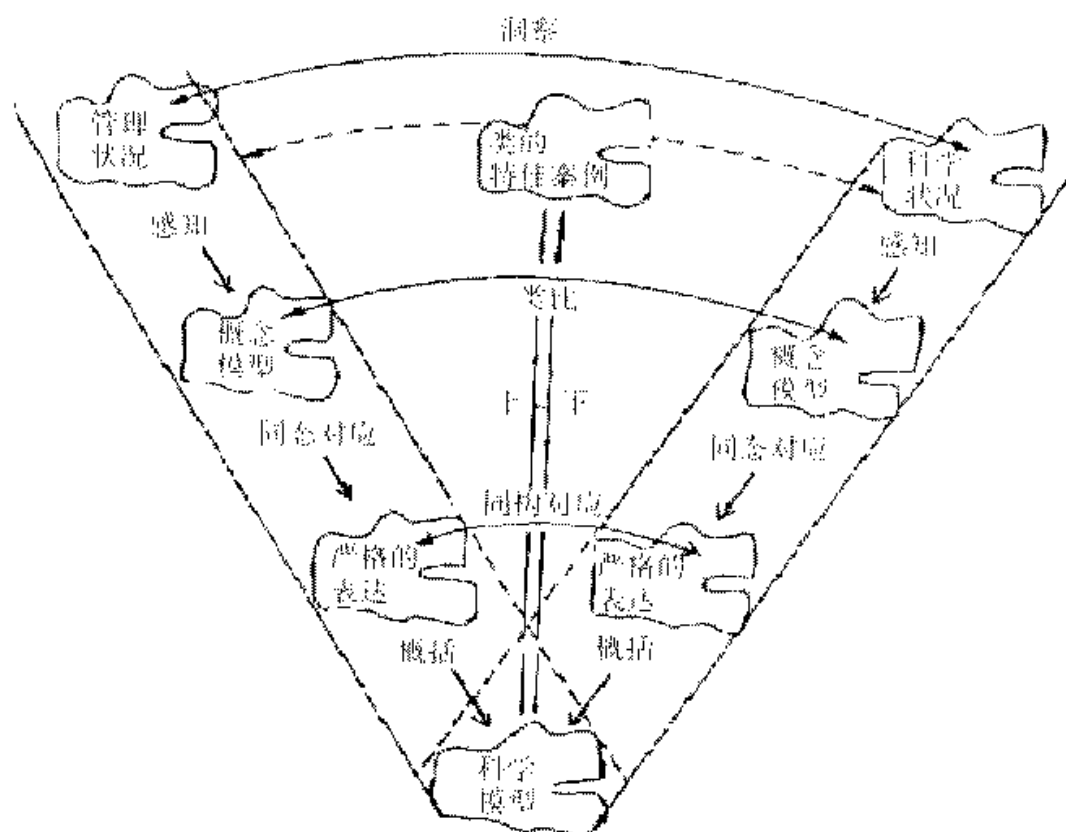


图 11.4(a) 人体的五个系统

在活系统中三要素概括如下：

E_1 ：操作。肌肉与器官的活动，这是人体的基本的活动，基本的工作。

E_2 ：元系统。它是大脑与神经系统（包括 S_1-S_6 ）。它的作用是使各个操作单元以一致、协调、和谐的方式统一起来和整合起来，成为一个有机整

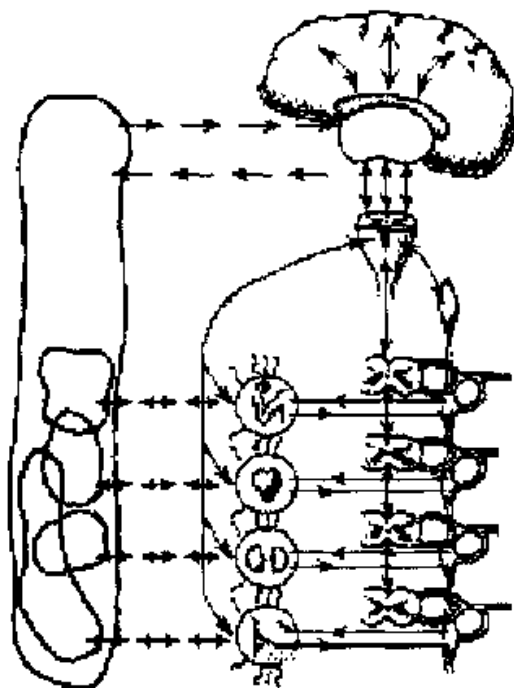


图 11.4(b) 人体五系统及其环境

体。请注意：元系统的概念最初是由苏联物理学家图琴提出来的（见本书 8.1.2），后来许多系统科学家运用了这个概念。贝尔这里运用元系统来指称神经系统，并不包括操作系统在内，这一点与图琴的元系统概念略有不同。

E_1 ：环境。所有与人体直接相关的外部世界就是环境。

按照贝尔的习惯，环境部分用一只鞋形来表示，元系统部分用菱形或正方形来表示，操作部分用椭圆形或长方形来表示，这样便得到人体组织三要素图（图 11.5）。

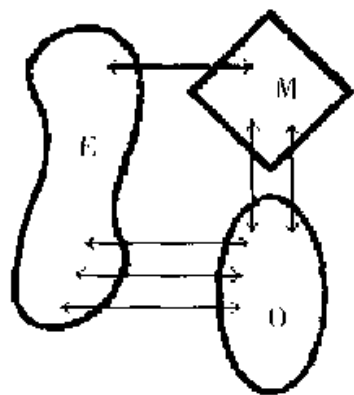


图 11.5 人体组织三要素图

三要素之间有一些双箭头的线 $\leftrightarrow$ ，按系统动力学的习惯，它是两个单箭头的线 $\longleftrightarrow$ 的简化。它代表各要素之间的信息流（在人体系统中包括神经信号的传递，在组织中包括电话、电讯、电脑互联网以及人员之间的交谈）、物流与能流（在人体系统中包括营养物质和废物的传递，在组织中包括货物流、货币流通、交通运输等）。三要素之间的相互作用在活系统中最重要的是保持整体各元素之间

的动态平衡以及整体与环境之间的动态平衡,它成为人体诊断与组织诊断的标准。失衡对人体、组织或其他活系统都构成一种病态。

▷▷ 11.2.2 活系统中的五个功能子系统

关于人体5个子系统的说明已经足够地抽象和一般化,使它能够运用于其他活动系统中,特别是管理组织中,不过这已经不是单纯的类比,而是一个科学的模型了。活系统有5个功能子系统。它们分别是 S_1 :操作系统; S_2 :协调系统; S_3 :优化控制系统; S_4 :开发系统; S_5 :政策系统。这5个系统对于组织的调节控制来说是必要并且充分的。我们现在用组织与管理的语言来解释这5个系统。贝尔为5个功能子系统绘了一个详细的图(见图11.6)。

1. 系统1:操作系统

系统1是直接执行组织任务的部分,它是组织中干实事的系统,所以称为操作系统。例如在工厂中,机房、机器和生产者都属于系统1。

系统1划分为许多子单元。在图11.6中绘出了两个这样的子单元。它们中的每一个都是活系统,各自与外部环境相应的部分(局域环境)发生相互联系,与其他子单元发生相互作用,并有自己的局域元系统,或者叫做局域管理机构。除此之外,这些子单元系统通过垂直的渠道与高层系统发生联系,通过这个途径接受高层的指令,并通过其传感器上传信息给高层系统。

这些子单元活系统,由于是活系统,有自己的自主性,自主地与环境发生相互作用,自主地进行负反馈自我调节,其约束仅仅是它属于整个组织的一个部分,执行组织的目标与任务,但并不排除它有自己的目标。因此,这些子单元之间会发生竞争甚至利益的冲突,这样就需要一个协调系统。

2. 系统2:协调系统

系统1的各个子单元之间不可避免地要产生利益的冲突,系统2的任务就是发挥协调一致的功能,解决子单元之间的矛盾与冲突,保证活系统的稳定。它之所以能够执行协调任务,除了这个系统能进行人际关系的情感的、文化的协调工作外,在制度上它制订子单元互不妨碍并且相互促进的条款、规则或流程。

在图11.6中,子单元1(OPRN 1)与子单元2(OPRN 2),还有没有画出

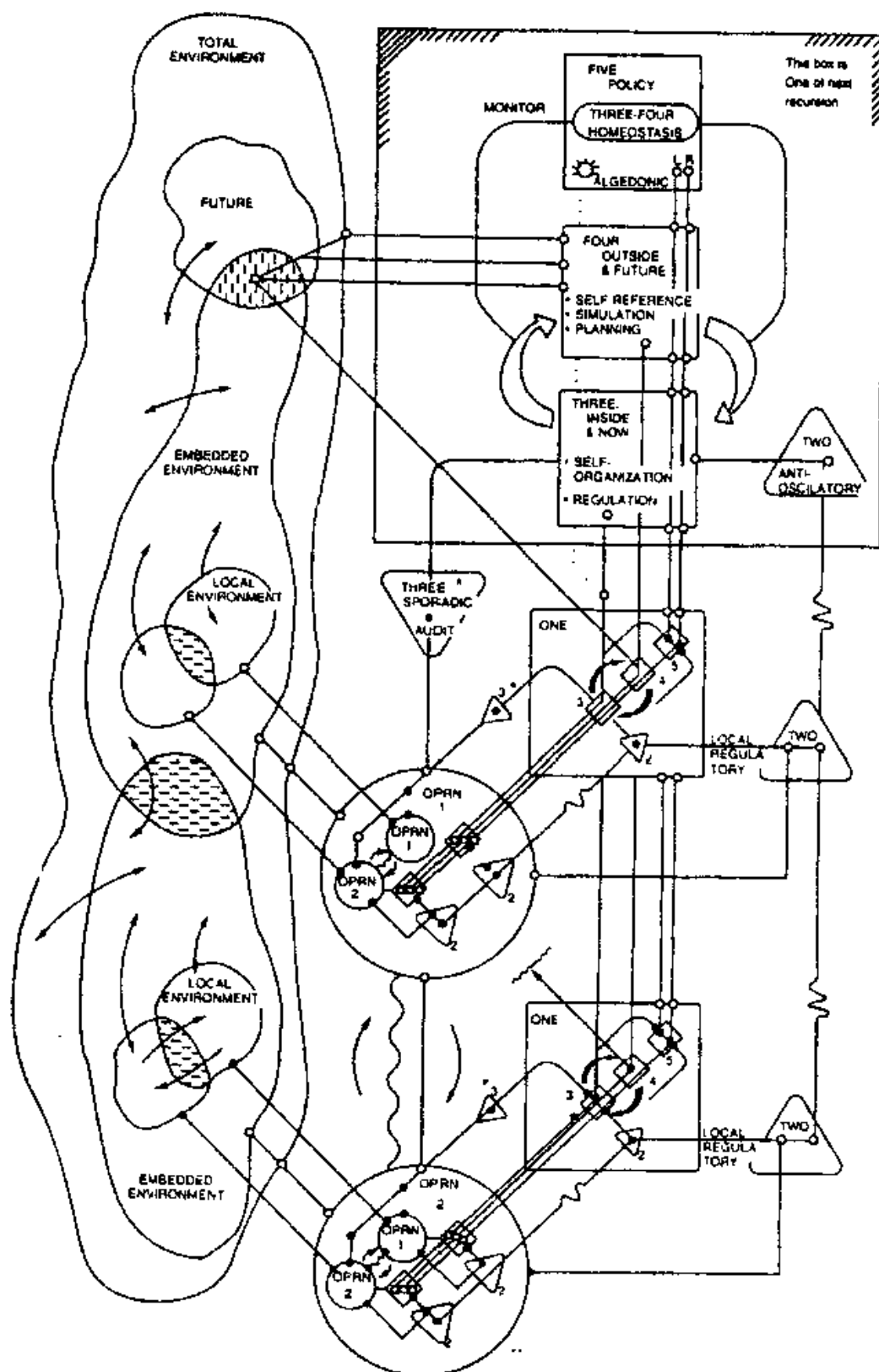


图 11.6 贝尔的活系统模型详图

来的子单元3、子单元4等等,如果组成一个操作流程或流水线,倘若其中某单元,例如子单元2,发生一些差错,子单元2自身的元系统企图调整自身的计划以修正其偏差,这就不可避免地要从例如子单元3中获得资源,并向子单元1供给产品。如果所有的子单元无指导地这样做,就会造成活系统本身的剧烈震荡。系统2的任务就是监测各子单元相互作用的信息,使其稳定,保持动态的平衡。在大学中,特别是在同一学院中,各位教授讲师都有其自主性,极力加强自身任教的课程,提高质量,或增加学时,或占用设备最优良的教室,争取更多的学生来上自己的课。倘若没有一个选课的调节制度,没有一个教学安排,没有一个排课时间表,整个教学系统就会出现混乱。所以贝尔在图11.6中很恰当地给系统2规定了调节(regulatory)功能和反震荡(anti-oscillatory)功能。

3. 系统3:优化控制系统

一旦系统1的各子单元已经协调稳定,力图使它们的相互作用优化便成为组织生存与发展的关键问题。这就是系统3的任务,可称之为优化控制。它密切注意系统1诸多子单元相互作用的复杂性,注意如果某甲干这个,某乙干那个,则会使整个系统更有效率。当这样配置具有额外效率(extra efficiency)时,就叫做“协同”(synergy)。

系统3怎样才能做到优化的控制呢?它并不制定政策,它只是从来自系统2和系统3*的内部信息以及来自系统4的外部的角度来解释政策。它只是为系统1的各子单元设置一个目标,并监督目标是否达到,政策是否执行。贝尔指出,由于我们假定系统1的子单元都是活系统,监控其行为信息的必要性在原则上只是要回答“是”与“不是”。在任何情况下要寻找 S_1 的信息相对说来不能过多,以便 S_3 能处理得过来。当然,这种优化控制,除了在信息上的指导之外,它有实力的地方是它还掌握某些资源的分配以保证系统1按政策、目标实施优化的运作。但贝尔指出,这个管理是一种资源的契约(resource bargain)的关系。即管理者向操作者说“我给你这些资源,你以制作某种东西或行为作为回报”。所以这种控制是契约性的,而不是专断性的和强制性的,不过它包含了某种奖罚制度。

系统3涉及的管理是内部系统在现时的情况,因此图11.6注明为“THREE:INSIDE & NOW”。

从图11.6中可以看出,系统3是上下左右信息联系的枢纽。在垂直关

系上,它向下传达政策,并根据情况向下解释政策,并向上传递来自系统1各子单元的信息,特别是与维持生存息息相关的信息。在左右关系上,它接受来自系统2的信息,并据此信息采取行动,又接受来自系统3*的特定部门的信息并做出回应。

在系统3之旁,有一特殊系统,称为系统3*。这是因为,系统3通常只能监控少数的“执行指示器”(performance indicators),后者“正确地”向它报告系统1的操作子单元的情况,但由于各种理由,特别是为了自己的生存,这些操作子单元往往倾向于报喜不报忧,特别是当情况变坏时更是这样。系统3*的作用就是随时去检查那些常规的报告,特别抽查某个子单元的报告,看它是否报告了真实情况。因此,图11.6称它为抽查性的审计或核查功能(sporadic audit)。因此,贝尔强调系统3*只用作审计核查,它并不是一种附加的信道来提交新政策的建议。

系统3及系统3*对下向关系处于某种警觉状态,但对上向关系则处于某种休眠状态,以防止高层管理系统受信息爆炸和信息泛滥的影响,以致不能完成它们的本职工作。 S_1-S_3 构成了贝尔所说的组织的“自主性管理机构”。它有能力在已建立的框架下,优化企业或其他组织的性能,即使没有更高层系统的干预,也能保持内部的稳定。然而,虽则它们能自主地处理自己的内部事务,或如贝尔所说的内部环境的事务,但它不具有对组织的外部环境的全局观点,因而没有能力检查共同的战略策略,对环境带来的挑战与机遇做出回应,这是系统4和系统5的任务。

4. 系统4:开发系统

一旦有了稳定协调和优化布局的操作单元,就必须保证组织系统能在变化着的环境中生存与发展,这就是系统4的主要任务。为此,系统4必须掌握总体环境。前面讲过,系统1的子单元只与局部环境发生关系,而系统3是处理内部事务的,不面对整体环境,因此,研究环境、分析环境将会带来什么挑战与机遇以及采取什么对策的重担就落到系统4的肩上。而为了达到这个目的,系统4必须建立环境的模型,以便根据这个模型预测未来,即它的潜在危机与机会。有关这些问题,我们在本书第10章复杂适应系统中已进行了详细分析。不过那里讲的是适应性主体,而这里讲的适应性主体是一批高级管理人员组成的系统。例如,他们可能会运用福莱斯特创造的系统动力学来预测工业环境的未来。

在认识到相关环境对活系统组织的挑战和机遇之后,系统4将与现时相关的信息传向系统3,即时采取对策;而长期相关的环境信息将提供系统5做最后判断和最后决策。如果说系统3是上下左右信息的交汇点,系统4则是内外信息的交汇点。因此它便是公司规划、营销、研究与开发以及公共关系之类的活动的大本营。所以贝尔将它看做是企业与组织的“运筹空间”,一个高层次决策会议在其中举行的“决策环境”。也正因为这样,系统4被简称为开发系统。在图11.6中,贝尔将系统4的功能定义为外部与未来(OUTSIDE & FUTURE),包括自我相关(self-reference)、模拟(simulation)、计划(planning)等。

5. 系统5:政策系统

系统5是指挥系统,负责指导整个企业或整个组织,它是政策制定系统,它是组织的最终负责者。但是一个设计得很好的组织,只有很少的决策是在这里做出的。需要在这里做出决策的主要是关于操作系统(S_1)应该怎样改变它们的行为来应对环境的变迁。做出这种决定要基于两类信息来源,第一类是经系统4过滤的有关环境的情报资料,第二类是经系统3过滤的有关操作系统的控制信息。这两种信息源及其处理与应对必须保持平衡,第一类信息是外向的和未来导向的,它告诉我们环境的变化要怎样适应,第二类信息表现一种内部需要,它告诉我们自主性管理机构需要实施最优化,它要求稳定。系统5必须适应外部环境,同时又必须保持适度的内部稳定。

对于以上有关活系统组成的见解,需要注意的是活系统模型图不是一张企业或组织的部门图,那种有关一个组织有几个科室的组织部门图对于了解组织的结构只是表层的,活系统及其5个子系统是深层结构与功能的模型图。有关这一点读者需要注意。

▷▷ 11.2.3 活系统的基本原理

- 活系统可以定义为特种环境下能够生存、能够成活的系统。这里所谓生存,指的是在一个较短时间里能保持它的大多数重要特征,在一个较长的时间里能保持某种身份认同的本质特征。关于这一点,我们在本书3.4.5中也有类似的表述。如果一个濒临破产的钢铁厂被地产商收购了去,改成电子电器工厂,我们也只能说这钢铁厂已经死亡,因为它的某种重要本质特

征已经失去了。这就是广义生存的含义。当然所谓生存,所谓成活,还应包含别的特征,如它的组成部分是可以自创生的,自我修复的,即自己能产生自身,并且自身的基本目的是保持自身的存在。一头大象是自己能为自己生存的,而一部汽车是靠外部力量、即使用汽车的人们来为它加油、给它维修、给它保养才成活下来的,所以汽车不是活系统。活系统的“活”字本身指的是自己为了自己的生存而能够将自己的重要基本特征保持相当一段时间的意思;至于定义中所说的在“某种特定环境下的生存”,是表示在一定的外界条件环境的界限之外,它不能生存。例如一个民族被入侵者消灭或同化,这个民族就不能生存了。但活系统的基本特征之一就是它在一个环境变迁的界限内能处理环境的变化。适应环境变化而存活下来,这就是活系统这个特殊概念的内涵。我们通常运用它,是将它看做是一种比较高级的复杂适应自组织系统,如人的本身以及人类社会的各种组织等等,因此典型地具有 11.2.2 所说的 5 个系统,这 5 个系统对于我们研究活系统来说是必要而且充分的。

从上节的 5 系统分析中我们可以看到,活系统组织模型表现了管理控制理念上的一个根本转变和根本变革。传统的管理概念是以各级管理机构为核心的。经理部门、董事会及其一套指挥机构是企业的核心,操作系统不过是他们达到自己目的的手段。贝尔的理念是彻底地将这个核心概念翻转过来。企业或其他组织的核心是操作系统,即系统 1,而管理部门从低层管理人员一直到政府首脑,从 S_2 到 S_n ,即所谓元系统,它的工作不过是为了使操作系统的子单元能够稳定、协调、优化地工作在一起,并保证它们能适应变迁者的环境而服务。用贝尔的话来说就是:“元系统的职责就是为操作单元提供服务。”这可以说是管理理念上的哥白尼式的革命,使组织既能有高效率的管理与效绩,又不陷入等级的、专制独裁的管理与控制,而比较正确地处理了管理中最棘手的问题:民主与集中的关系,地方分权与中央集权的关系。贝尔认为,一旦一个组织的元系统离开了“服务原则”,自己把自己当做是活系统了,这个组织就出现一种病态,需要治疗了。我们不是一直提倡“为人民服务”吗?如果真正做到不是为自己服务而是为人民服务,那就可以说与贝尔的活系统理念是完全一致的。贝尔的这个活系统组织管理理念建立在下面两个基本原理基础上。

第一个原理,叫做贝尔递归原理,它的表述是:“任何一个活系统总是

包含着另一些活系统和包含于另一个活系统之中”。^① 因此活系统本身是层次性的,很像俄罗斯的玩具套娃和中国式的套箱,一个套着一个,而每一个不同层次的活系统都受着同样组成和同样规律的支配。一个大学是一个活系统,它的操作系统子单元是各个学院,例如一个大学包含三个学院;同样各个学院又是一个活系统,它的操作单元可能是各个系,每一个系也都是一个活系统,系下面的教研室是它的操作单元;教研室又是一个活系统,它的操作单元的最低层次可能是某个个人,例如一个教授。这个教授本身也是一个活系统,它的教学活动也是由5个子单元组成的。他要执行各种独立的任务或工作,这是他的系统1,如到图书馆去研究教学资料,编写某章教材,上课前重读和熟悉自己的教材和讲义,到某个教室去上课,开动电脑投影仪,讲解课程内容,回答学生的问题,等等。这虽然只是他一个人的工作,但是却构成一个操作系统。他必须分配时间,有条不紊地协调这些操作(这是他的系统2);他还必须向上汇报他的工作进度,并接受负责教学的院长的教学检查;他还要考虑最优地完成某部分课程的关键是寻找最适当的案例进行解说并使用Powerpoint和Java程序;还要考虑怎样通俗地说明某个高深数学公式等。这就是他的系统3。由于学生反映课程听不懂,又由于他身体不佳需要到医院做手术,同时由于他最近被委任为学院副院长工作较忙,这些环境的变迁迫使他在教学计划上需要做调整,下学期暂停让学生选修这门课,改在高年级上这门课,这就是他的系统4。不过他的目标是无论如何要做好这门新课程的开设工作,使这个学科在本学院站稳脚跟。因为他是一个老教师了,很熟悉教师的职责何在,所以他坚持中共中央在20世纪60年代就制订的高教工作六十条的规定,不论行政工作多忙,要保证业务教师有六分之五的时间做好本职教学工作,这就是他的系统5。

活系统的递归结构在图11.6和图11.7中有精细的表示。关于这种递归系统,我们在本书4.2.2讨论层次结构中遇见过,特别是在讨论混沌与分形中,图7.28的康托集,图7.29科赫曲线以及图7.34的蒙德布罗集都是递归系统的最典型的表現,部分完全重复整体的结构并受同样规律所支配,当它反复叠代运作时就产生了复杂性。贝尔递归原理的新颖之处就在于,它讲的是管理活动系统,它的操作子系统同样是活系统,所有的活系统受着

^① S. Beer (1979). *The Heart of Enterprise*. Wiley, Chichester. p. 118.

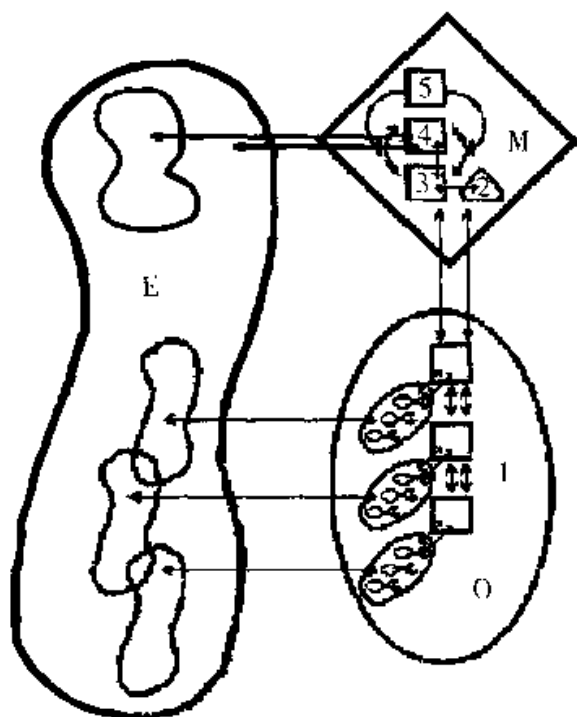


图 11.7 贝尔活系统递归图

同样的规律支配。贝尔说：“从控制论的眼光看，所有的活组织都精确地是一样的，它们在基础上都由同样的规律写成”。^① 贝尔递归定律的一个重要结论是，由于组织的操作系统的每一个子单元都是一个活系统，它本身就有独立的生存能力和适应周围环境的能力，因此它本身具有自主性，并应该给予足够的自主性。我们在管理工作上应该将管理对象看做是目的本身，而不应仅仅将它们视做是一种工具。这就是人性化的民主管理而非机械化的等级制度的独裁管理的理论根据之一。

第二个原理是由艾什比发现的必要的多样性原则和由贝尔发挥的多样性工程。在活系统中，操作子单元有能力应付变迁着的环境吗？系统 2 和系统 3 有能力履行它的处理内部事务的功能吗？系统 4 和系统 5 能够处理内部环境与外部环境的冲突吗？系统 5 的政策能有足够的信息通道并进行上下沟通吗？这些问题本质上是一个处理系统的多样性问题。活系统管理理念的几个关键思想，如强调自我管理、基层操作单元的自主性和自组织、管理系统的主要任务是聚合一个组织和服务于该组织，这些理念都主要来

① 转引自 Jon Walker: *The viable System Model*. Byicom, CRU, CAG and Jon Walker, 2001, p. 84.

自必要多样性原理和多样性工程。因此我们在这里需要较为细致地讲解艾什比必要的多样性定律及其在管理学中的应用:贝尔多样性工程。

什么是多样性呢?我们在第6章讨论复杂性中已经讲过,它是系统及其元素存在的状态的数目,是系统复杂性的一种度量。从控制论的观点来看,艾什比发现了必要的多样性(变异度)定律。在本书4.4.3中我们用信息论证明了这个定律,现在用比较通俗的方式再次阐明这个定律。请看艾什比在《控制论导论》一书11—11节所绘的图(图11.8):

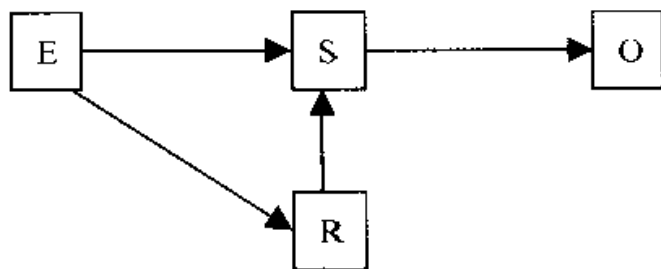


图 11.8 艾什比论必要的多样性

图11.8是一个基本的调节系统,操作系统S总是试图产生所期望的输出O,使O保持在存活的、稳定的范围里,但是环境E却是不断变化着的。系统的调节器R的作用是监察E,给S发出适应的信息来对抗E的干扰,使S维持稳定的输出。例如你要使自己的房子保持干燥与稳定,当外边下大雨时,你用关闭窗户的行动来对抗风雨的袭击。不过如果外界发来一枚导弹,你如何保持你房子的稳定性、甚至如何保持你自己的稳定性呢?那就不得而知了。这意味着R要保持控制S,至少要有能对付与环境干扰的多样性一样多的多样性。“只有用调节器的多样性,才能压低干扰所引起的多样性,只有用多样性才能破坏多样性。”^①这就是艾什比表述的必要的多样性定律。将这个定律运用到活系统中,也就是说,如果一个活系统组织要在环境中保持它的成活性(viability),管理系统要保持对组织的有效调控,则组织必须展示出其能应付环境的多样性至少要等于环境干扰的多样性,而管理所展示的处理组织问题的多样性至少要等于组织所展示的多样性。以V表示多样性,E表示环境,M表示管理系统(即活系统中的元系统),则要

^① W. R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall LTD. 1957, p. 207.

使管理具有有效的凝聚力和调控力,要使活系统具有成活力或生命力,就必须满足下列的公式:

$$V_M \geq V_S \geq V_E$$

但是,实际的情况却不是这样。实际情况是如图 11.9 所表示出来的那样: $V_E \geq V_S \geq V_M$,即环境的多样性远远大于组织的多样性,而组织的多样性又远远大于管理的多样性。在这里我们应该说出一句不好听的话:控制论,实际上就是控制不住论,每一个人都常认为自己能控制住自己,控制住自己的各种事情,但是每一个人都以控制不住自己(至少是疾病与死亡)而告终。社会上有许多领导人和领导组织都以为自己能控制一切,领导一切,但是每一种组织如同每个生命体或者活系统一样,都以控制不住一切和领导不了一切、甚至领导和控制不了自己而告终。这种情况的发现类似于能量守恒定律和熵增定律的发现,科学家只好宣布第一永动机不可能,第二永动机也是不可能的。法国科学院就在 19 世纪宣布不再接受有关永动机的设计的专利审查。不过这件事本身是积极的,它使工程师们工作得更加踏实和有效,也使管理工作者们工作得更加踏实。使用各种管理策略在一定范围里、在一定程度上是能够达到必要多样性的要求的。这就是贝尔所说的实施多样性工程,其基本要领是:(1)尽可能放大活系统的多样性和管理系统的多样性。(2)尽可能衰减环境的多样性和活系统对于管理系统(元系统)的多样性。图 11.9 展示了管理的复杂性及其放大与衰减策略。

1. 首先来看活系统与环境的关系。第一,环境变化莫测,它的多样性和突发性显然大大超过活系统的多样性。但是这些多样性只有一部分与活系统有关,活系统必须有一种装置过滤掉环境中对它关系不大、干扰不多的信息。对于一只青蛙来说,这个过滤器首先是通过眼睛来进行,然后通过头脑中的分类器,它只需在环境中注意两种事物,一种是它能吃的食物,另一种是会吃掉它的天敌(参见本书的 10.3.1)。这就是衰减环境的多样性。组织活系统显然可以向青蛙学习,例如我们的电脑装上过滤器就可以将每天烦扰我们的垃圾信件过滤掉。第二,组织并非必须亲自处理环境中与活系统相关的大量事件。以一个汽车制造厂为例,它必须及时出售它生产的汽车,但需要者遍及全国,如何对付这种多样性呢?汽车厂当然不希望亲自向全国每一个需要它的产品的人发售,它利用一个在环境中的代理商的销售网络,其在全国都有销售点。这就大大放大了它的多样性,衰减了顾客的

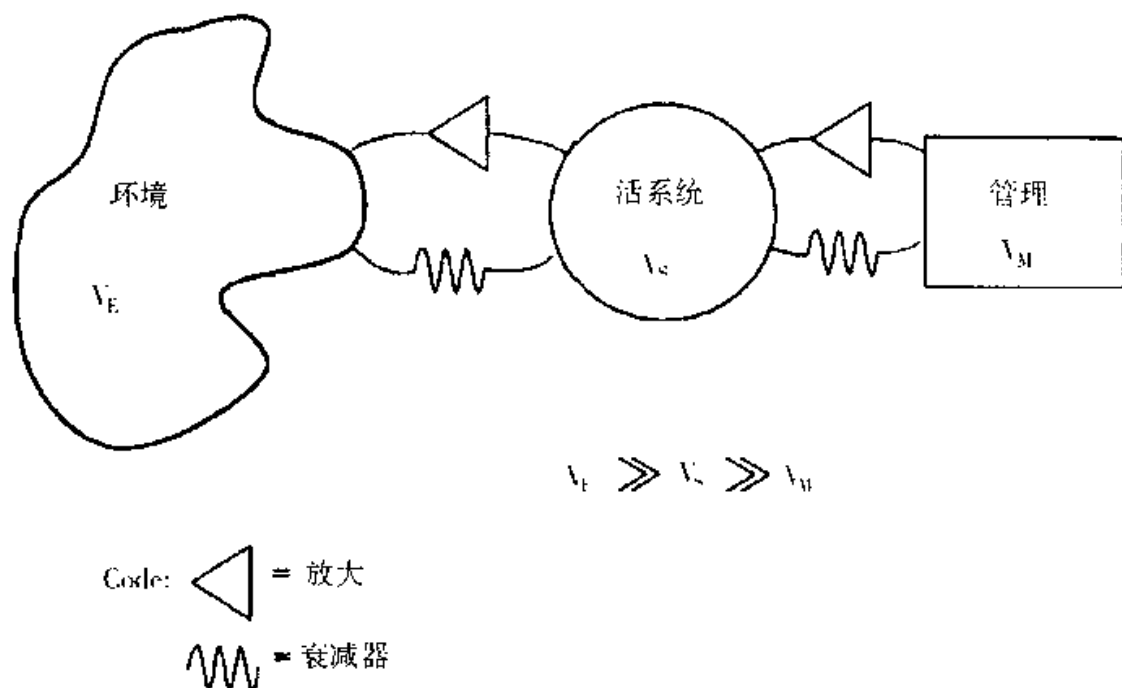


图 11.9 管理复杂性及其对策

多样性,使它变为一个月份的或年度的总订单就行了。这被称为只处理剩余多样性(residual variety)。这个剩余的环境多样性就只是通过环境自组织和环境自调节仍不能吸收的多样性。

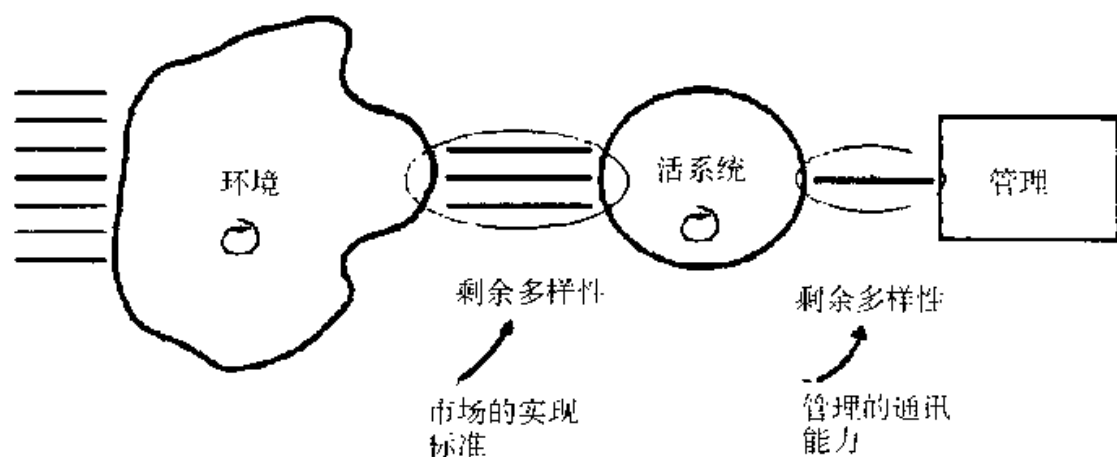


图 11.10 剩余的多样性

2. 从活系统中元系统(管理系统)与操作系统的关系来看,操作系统的复杂性和多样性显然大大超过管理系统的多样性。贝尔多样性工程所使用的策略是增加管理系统的多样性。如顾问企业顾问,他们的点子特别多,训

练管理人员,使他们有应对和解决工人提出的各种问题的能力,必要时还要增加电脑与增加管理员,这是放大管理系统的多样性。如何减少操作系统中的多样性?当然,制订协约、公约或规则,使他们遵守规章、遵守纪律,固然是一种减缩多样性的方法,但是,贝尔极力反对独裁管理和惩罚手段,他认为最好的方法是让工人自己管理自己,实行自治,给工人授权解决自己的问题,训练他们的工作能力。教学工作也是如此,教授与学生组成教学活系统,教授的工作在某种意义上处于元系统的地位。课后遇到学生的大量疑难问题,除非放弃教授职责对此不闻不问,否则教授一般无法应对所有疑难问题的多样性,但他们可以放大自己的多样性,如增设助教职位、利用互联网在网上回答学生疑难、介绍有关参考书、增加与学生见面的答疑时间等等。他还可以采取措施,组织学生自己讨论,自己解决问题,以及将问题整理集中起来做一次总的答疑,等等。这就是一个多样性的平衡工程。贝尔说到企业管理时讲过:“系统管理者原则上不能接受和应付他所管理的 S_1 活系统的任何人产生的过分的多样性。自治理论、民主管理和分权理论的开端就是建立在这个简单事实的基础上。”^①

正是基于必要的多样性原理,贝尔提出了组织的四项原理。其中组织的第一原理是:“遍布于一个制度系统的管理的、操作的与环境的多样性倾向于相等,它们应该设计成对于人和对于成本来说都最少危害。”^②艾什比 1974 年在他的一篇讲话“设计自由”中也讲到:“必要多样性定律对于管理者来讲,像爱因斯坦的相对论对物理工作者一样重要。无论人们对其含义谈论得有多久,它揭示了复杂系统的某些特征,并且不失任何影响力。”^③

11.3 复杂性与管理

本书从第 6 章到第 10 章详细讨论了混沌、自组织和复杂适应系统。混

① S. Beer, *Diagnosing the System for Organization*. Willey, 1985, p. 38.

② S. Beer, *The Heart of Enterprise*. Willey, 1979. p. 97.

③ 转引自 M. C. 杰克逊著《系统思考》,高飞、李萌译,中国人民大学出版社 2005 年版,第 99 页

沌和复杂性理论是20世纪三大科学革命之一(其他的两场革命是相对论和量子力学)。这三大科学革命构成了新的思维范式,本质上是整体性和层级性的系统与环境协同进化的宇宙观,以及将一切事物看做是过程的某种持续性和相互关系的某种模式和纽结的动态过程。特别是混沌和复杂性理论的研究,提出了一些前所未有的新概念,如“非线性和对初始条件的敏感性”、“混沌边缘与分叉临界点上的自组织”、“突现与创造”、“奇异吸引子与自相似”、“复杂适应性和适应性景观”等。这些新概念为组织与管理科学带来了极大的冲击,将不可预测性、变易性、多样性、非常规的创新性和突现的组织等问题带进了组织与管理理论中。不过,无论在国内还是在国际上,这些研究都还刚刚起步。下面我们试图对复杂性给组织与管理提供的启示列出几个要点。

▷▷ 11.3.1 不可预测性与混沌边缘的管理

英国著名系统管理学家R. 斯泰西模仿威佛的组织性与复杂性绘出了复杂性系统在状态空间中的定位图。它的纵坐标是管理论题的意见一致性程度,而横坐标是管理问题的确定性程度。

在该图中他划分出下面五个区域。

1. 确定性和一致性程度高的领域。所谓确定性程度高,就是原因与结果的关系是决定性的和确定性的,凭过去的经验就能预测到未来的结果。所以行动也可以有高度的确定性。而所谓一致性程度高,就是在管理人员之间和组织内部人员之间容易取得一致意见。这个领域里的管理明显地属于传统的理性决策:收集足够的过去资料,预测未来的结果,做出可行计划来监控实际行为,以改进和提高效率。

2. 确定性强但意见远不一致。有些管理问题有很大的确定性,结果是十分明确的,但问题是高层领导对这种结果是否满意不能取得一致意见,因而没有统一的计划与任务,这时政策变得很重要。这就是强调合作、反复协商和适当妥协。否则管理就完全失灵了,或者走向个人专断,即所谓一个人说了算的错误道路。

3. 完全非确定但意见完全一致的管理。在这种情况下,依预定计划的监控是不存在的,是共同的使命感和想像力来决定组织中人们的行动,不能事先确定一种行为路线。

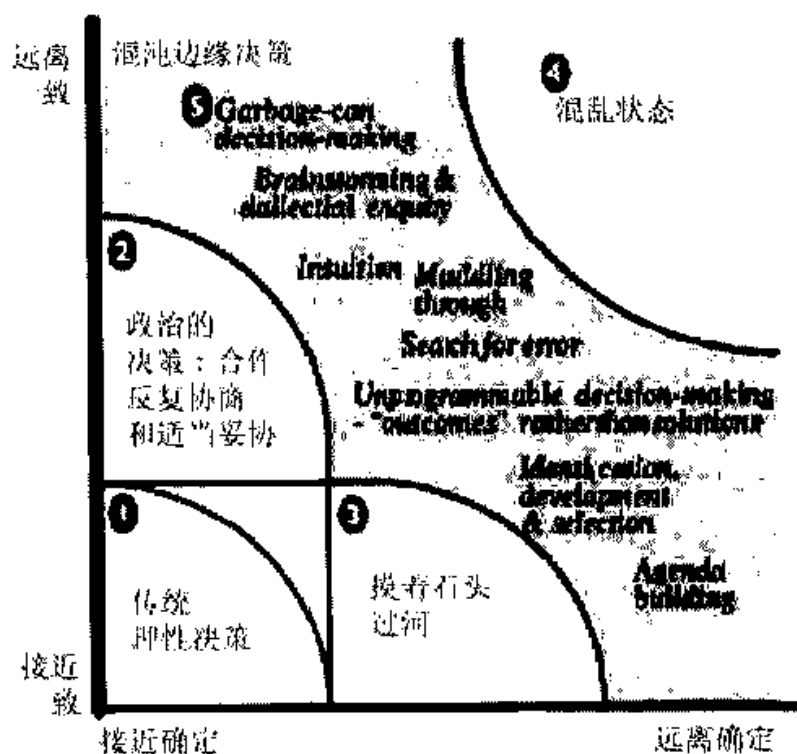


图 11.11 斯泰西的一致性确定性矩阵

4. 混乱状态。这是组织的高度不一致和高度不确定的行为状态。组织与管理的任务是尽可能避免这种混乱状态,它会导致组织的瓦解和大灾难的到来。大概在“文化大革命”中,有许多组织陷入这种管理混乱的状态。

5. 混沌边缘(复杂性地带)。复杂性与管理的研究对象主要是在这个广大的领域,它介乎混乱、混沌领域与传统管理领域的中间地带。斯泰西称它为“复杂性地带”。在这个地带里,传统的管理进路和管理方法并不十分有效,甚至大多数失灵了。于是管理过程需要的是高度创造性、革新、与过去决裂并创立新的运作模式。必须运用多样性的进路对付多样性的情况。

为了说明这种复杂性地带的管理策略或管理行动,我们可以从最确定最一致的管理点到最混沌最混乱的管理点之间画出一条斯泰西矩阵的对角线(见图 11.12)。

在这个对角线上,可以标出 7 个点,点①是直接指引策略:例如华南师范大学哲学所举行毕业论文答辩,所长交代几个学生搬动一下桌子、凳子,布置好会场,这个管理是完全确定的和一致的,不会出现突现的结果。点②

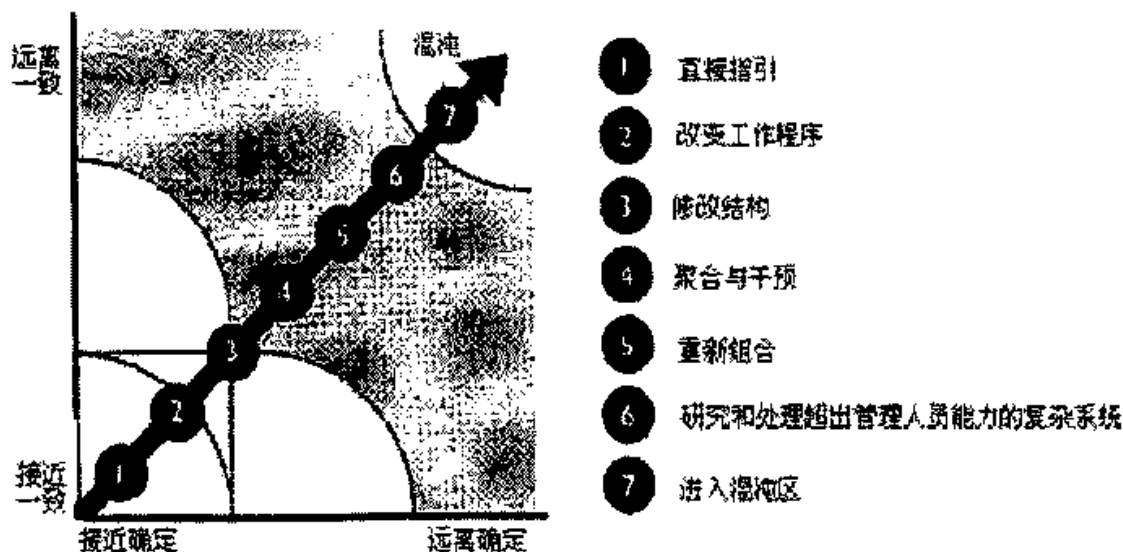


图 11.12 从确定性、一致性到混沌的管理策略

开始超出一致性和确定性的管理，例如答辩委员会主席与某个答辩委员协商，请求他在答辩会上特别要指出毕业论文作者的缺点与问题。这个答辩委员要求改变原来的工作程序，要经过自组织和自定向来准备他的质疑发言，这可能会产生突现或没有突现的结果。点③是修改结构的管理，超出了确定性和一致性，是属于确定性和一致性边缘上的管理。例如，华师某学院要采取措施申请博士点，有了博士点和没有博士点的单位有不同的内部结构和不同的学术发展要求，因此申报博士点的目的是求得一种突现的变化，这已经是复杂性管理了。点④和点⑤表示要聚合与干预各级组织系统。例如在华师成立公共管理学院，哲学所从别的学院分离出来与其他系，如教育经济管理系重新组合为新学院，这里有一系列复杂适应系统的重组管理。其目的是使一个被管理的组织系统的机构进入一个新的吸引子，产生一个重大的突现结果。点⑥是研究和处理超出领导者和管理人员能力范围的复杂系统。如股票市场上的投机，进行长期天气预报等。点⑦是进入混沌区。

▷▷ 11.3.2 生成关系与策略创新

培育生成关系，进行策略创新，是著名经济学家、圣菲研究所成员戴维·兰纳(David Lane)与ROLM计算机公司创始人罗伯特·马克斯菲尔德(Robert Maxfield)提出来的，旨在解决复杂性组织的技术开发和组织开发问题。他们和斯泰西一样，认为简单、稳定、可预见的组织管理情景可以用传

统的管理进路来解决,但对于复杂的、变化层出不穷的、不断创新和难以预见的管理情景,传统的管理与计划不起作用,这时组织需要新技术、新策略和新方向。这些新策略、新方向来自何处?他们指出,来自“生成关系”(generative relationships)。所谓生成关系,就是“不能提前预见到的价值的新源泉”。但如果人们不能提前知道哪一些来自组织内或来自组织之外的关系或团队能创造出新的技术和新的策略、给组织带来转机,那他们到哪里去发现它们、培育这些生成关系呢?他们提出了建设生成关系的几个预备条件:(1)它有明确一致的方向:在利益领域里,他们有共同的明确方向,并有兴趣有能力实现这个方向。(2)它有负责任的承诺:他们明言地或不明言地承诺要坚定不移地进行某种我们所需要的探索。(3)它有完成任务的能力:所有参与革新的人们都十分积极并且有从事相关工作的能力。(4)它有竞争的意识:在他们的内部和外部有各种不同的多样性的观念进行着竞争。如果具备这四个预备条件,这样的团体、小组或人群就可以看做是能产生新技术、新策略、新方向的生成关系的候选者。大概参加人类基因组计划并干了其中1%的工作的中国小组就是这样的“生成关系”,只可惜在成名之前许多人认识不到这一点。

以电脑的电话线连接系统为例,早在20世纪70年代,在ROLM这个小电脑公司里,有为数不多的几个青年电子工程师在进行军用微型电脑的研制。为了使自己的事业有多样性的发展,他们产生了通过电话线进行电脑联网的观念。当他们有了一些基本系统之后,便寻找一些中型的电子企业进行合作,进行数字电话系统、电话线联网的转换器系统的开发研究。许多工厂都怕承担技术风险,不敢与他们合作。但是敢于与他们合作的公司结果不仅使电话系统大大降低了成本,而且产生了互联网这个新技术革命。这个创新策略、创新技术不是来自IBM公司,也不是来自AT&T公司,而是来自一个小公司,它成为突现创造新观点和新策略的“生成关系”。

▷▷ 11.3.3 正规系统与影子系统的均衡

因为混沌边缘需要促进组织的稳定性与对这种稳定性进行挑战的两种力量之间的一种平衡,所以极难达到又极难维持。为解决这个问题,斯泰西提出了另一个复杂管理思想,就是要在正规系统(Legitimate systems)与影子系统(Shadow systems)之间保持一定的张力。



图 11.13 正规系统与影子系统

复杂性理论家 R. 斯泰西曾经指出,所有的组织实际上都是由两种组织所组成的:正规组织和影子组织。正规系统由公司的主流文化以及由这种文化支持的正规等级、规则以及交往模型所组成。影子组织就隐藏在这种情景的背后,它由小道消息、背后议论、谣言工厂以及非正式程序和小集团之类的东西组成。传统的管理理论或者完全忽视影子系统,或者公开宣布向它们开战,以“扫除组织发展和组织改革的绊脚石”。

斯泰西指出,由于影子系统这个“海港”的思想和视角如此丰富多样,并且没有约束和规范,它常常是组织中的创造性的策源地。而正规系统则常常陷入循规蹈矩、例行公事,而没有什么创新性。所以如果领导人善于广开言路,倾听各方面的声音,而不是向影子开火,则两个系统的并存可以大大有利于创新的出现,甚至可以将组织推向适应性景观的更高峰。

第 12 章

复杂系统管理方法

人类的各种组织是世界上最为复杂的系统,对它的管理本身需要复杂系统思想和形成复杂系统的管理方法。上一章讨论了复杂系统思想的一些要点,本章要讨论复杂系统的管理方法,也就是“问题求解”的方法,即解决管理问题的进路。关于解决管理问题的方法,我们首先区分硬系统方法和软系统方法,进一步讨论解放型和批判型的系统方法。本章第1节(12.1)讨论硬系统方法,第2节(12.2)讨论软系统方法,第3节(12.3)讨论解放型和批判型系统方法。硬系统方法和软系统方法的区别主要在下列三个论题上:(1)硬系统方法所要解决的问题是,这些问题或困难是明确的,目标是比较清楚的,管理的系统方法的主要任务是寻找最有效的手段来达到这个目标。它们的大部分问题可以通过建立模型,用数学的方法——如运筹学、线性规划、决策论等方法——来解决。而软系统方法要解决的问题是不明确的,或者说要解决什么问题本身就是一个最大的问题,而且具有不同世界观、价值观和不同利益的人们对于问题所在有不同的图像、观点和见解。因此我们只能称它为问题情景(Problem situation)。(2)硬系统方法认为存在着问题的解,就像数学上许多方程是有解的一样,这些解在很大程度上是技术性的,问题以解决而告终。可是软系统方法认为,我们干预问题情景的目标是缩小组织系统的病态,使问题情景得到改进,人际之间的分歧得到调解、妥协和缩小,这是一个处理人类的活动系统问题,是要经过反复的学习循环而得到的。(3)两种系统方法对复杂性和系统这些概念的理解和使用不同。硬系统方法主张者认为系统就是现实世界的事物,是现实事物的复杂性体系。系统的组成部分客观上就具有达到整体所要求的某种目标的功能,所以被叫做功能主义。有关功能主义,我们已经在第5章中进行了分析。而软系统方法则认为,系统是用来组织我们有关问题情景的思想概念

的,系统及其复杂性是我们的思想建构,不同的思想概念对同样的问题情景有不同的诠释。就像斯大林对列宁主义的诠释与赫鲁晓夫和戈尔巴乔夫对列宁主义有不同的诠释一样。这种社会观叫做诠释主义。M. C. 杰克逊认为软系统方法本质上属于诠释主义。^①了解了这几个基本观点的区别,我们就可以首先讨论硬系统方法了。

►► 12.1 硬系统方法

硬系统方法,原名为系统工程,是一门新兴的学科,它主要是讨论大型的工程系统、复杂系统、人机系统的系统分析、系统设计和系统管理的问题,因而本身是跨越许多学科的交叉学科和综合学科。虽然它的一些概念可以追溯到古代,但一般认为这个学科的诞生是在20世纪30年代,因为20世纪30年代美国无线电广播公司(The Radio Corporation of America)在发展电视广播事业中首先引进了一种叫做系统的研究方法。而到了第二次世界大战期间,与军事调度密切结合,世界上有许多运筹学小组提供了今天叫做系统工程的有关系统的哲学和技术。在第二次世界大战后,美国空军于1946年建立兰德公司(Rand Corporation),提出了一种非常有用的成本效益的系统分析方法,兰德公司称之为“系统分析”。它也是我们今天所讲的系统工程的一部分。后来贝尔电话实验室工程师A. D. 霍尔(Arthur D. Hall)综合上述成果,首次使用系统工程的概念将系统工程定义为研究、设计、开发大系统的工程方法论体系,在1962年写了《系统工程方法论》一书,成为硬系统方法论或系统工程的奠基性著作。^②系统工程后来随着系统科学和管理科学的发展又有了很大的发展,特别是系统工程在阿波罗登月计划的实践中得到了非常成功的运用,使它威名大振。系统工程与运筹学结合在一起,成为世界上许多大学、特别是管理学院的通用课程。系统工程学的主要特点和优点,就是它的整体优化方法。正如1967年美国学者H. 切斯纳

① 迈克尔·C. 杰克逊:《系统思考——适于管理者的创造性整体论》,高飞、李萌等译,中国人民大学出版社2005年版,第273页。

② Arthur D. Hall, *A Methodology for Systems Engineering*, D. Van Nostrand company, INC., 1962.

特(H. Chestnut)在《系统工程学的方法》一书中所指出的:“系统工程认为,虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分所组成,而这些功能部分之间又存在着相互关系,但是每一个系统都是完整的整体,每一个系统都有一定数量的目标。系统工程就是按照系统整体的各个目标进行权衡与协调,以期求得系统功能的最优化,最大限度地使其系统组成部分的功能相互适应的一门科学。”^①这个定义强调系统工程是这样一种系统方法,它的目的是达到总体最优以及实现目标的具体方法与途径最优。

硬系统方法或系统工程的认识论就是杜威的科学认识程序学说,关于这一点 A. D. 霍尔在《系统工程方法论》一书中,^②H. A. 西蒙在《管理决策新科学》一书中都直言不讳。^③

杜威早在1910年出版的《我们怎样思维》一书中,以及后来在1938年出版的《逻辑:探索的理论》一书中,都反复论证了科学与生活就是解决问题。生活本身表现为一系列问题,最后以一个不能解决的问题而告终。他在《我们怎样思维》一书中提出,解决问题的探索有5个步骤:“(1)察觉到困难;(2)困难的所在和定义;(3)可能的解决方案的设想;(4)运用推理对各种设想的意义与蕴涵所做的发挥;(5)进一步的观察与实验,它导致对设想的接受或拒斥,即作出它们可信或不可信的结论。”^④这里要附带说明一下,科学哲学家卡尔·波普的进化认识论的基本公式 $P1 \rightarrow TSi \rightarrow EE \rightarrow P2$ (见本书4.5.3),也是起源于杜威的认识程序学说。不过与杜威不同,波普从来未给“问题”下过明确的定义,并且晚年(20世纪70年代以后)的波普总是使用“问题情景”的表述来代替“问题”的表述,他已经有了某种软系统问题的意识。而杜威《我们怎样思维》一书中对问题的表达,总体上是属于硬系统问题的意识。他所讲的问题是有明确定义的,他说:“问题或困难就存在于现有条件与所期望的结果之间的冲突之中”,^⑤“问题规定了思维的目的

① H. Chestnut, *Systems Engineering Methods*. New York: Wiley, 1967, p. 10.

② Arthur D. Hall, *A Methodology for Systems Engineering*, D. Van Nostrand Company, INC. 1962, p. 88, p. 91, p. 97.

③ H. A. Simon, *The New Science of Management Decision* (rev. ed.) Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977, p. 34, pp. 40-41.

④ John Dewey, *How We Think*. Lexington, Mass: D. C. Heath, 1910, p. 72.

⑤ *ibid.*, p. 75.

标和控制思维的目标”,^①“(解决)问题就是发现一个中项,将它插到目标与给定手段之间,使得它们协调起来”^②。我们可以用一句话表达起源于杜威的硬系统方法,这就是“问题是什么?可供选择的方案有哪些?哪个方案最好?”的三段法。

不过,由霍尔总结出来的系统工程方法论将这种思维方式具体化为下列6个程序或6个方面。

1. 问题定义(Problem Definition)。
2. 目标选择(Selecting Objectives)。
3. 系统综合(Systems Synthesis)。
4. 系统分析(Systems Analysis)。
5. 最优系统选择(Selecting the Optimum System)。
6. 计划实施(Planning for Action)。

我们现在分别讨论这6个问题:

1. 问题定义或明确问题

科学研究与人类行动都是从问题开始的,即从一种不确定状态、有问题的状态开始,在这状态下人们有某种需要要满足,有某种目标要寻求,并思考如何去满足某种需要和追求到某种目标,所以问题就是未满足需要的一种外部表现或意识到一种目标状态与当前状态的差距。因此,要定义问题或明确问题就包括两件事:(1)查明一种需要;(2)查明达到这种需要的环境条件或可行条件。前者叫做需要研究(Needs research),后者叫做环境研究(Environmental research)。

需要研究当然要研究委托人、委托书对工程有什么要求,但归根结底要研究顾客和市场有什么需要,社会的政治经济环境对系统有什么需要。需要研究必须详细收集资料,并尽可能从一般需要中演绎出具体的多种多样的需要,包括(1)设计出新功能。例如钟的一般功能是计时,但可以设计出新功能:闹钟。(2)在现有功能的基础上提高功能的档次,例如长寿、耐用、易操作、更安全、更有高技术标准等等。(3)降低产品价格,例如使用新的便宜的材料、新的设计、新的制造方法以降低成本,增加社会需要。(4)扩

^① John Dewey. *How We Think*. Lexington, Mass: D. C. Heath, 1910, pp. 11-12.

^② *ibid.*, p. 72.

大销路,如改进外观、形式、包装。所有这些都属于需要的研究。

环境的研究包括物理与技术环境的研究,看看有哪一些新思想、新技术、新材料、新设计可用于满足我们的需要;包括自然环境(气候、植物生活的状况)的研究;也包括经济环境、政治环境和组织环境的研究,看看本系统工程的资金是否充分、人力是否充足、政府是否支持以及其他社会的和个人的因素如何等等。

系统研究中的定义问题或明确问题就是将需要研究和环境因素的研究结合起来,从环境因素及其发展中找到满足需要的条件,并从需要的状况中找到改变环境的方向。霍尔说,这种结合就像构造元素周期表来发现新元素一样,探索过去在环境中还没有而今后能够实现的新的系统工程。

以美国 1961 年决定用 10 年时间将人送上月球并返回地面的阿波罗登月计划为例,对这个系统工程的研究首先要明确问题。这个认识步骤有两个方面:(1)需要研究:研究将人送上月球的政治、经济、科学技术、文化上的需要。在政治经济上要开展空间竞赛,争取空间优势,提高国家威力,进行这个系统工程对美国完全是必要的。在科学上是要了解月球上岩石的成分与种类、造成月球坑穴的原因、月球的年龄、火山活动的行踪、轰击月球陨星的数目、月球上是否有生命物质……这些探索也是完全必要的。(2)环境的研究。在研究了需要之后,就要研究达到这个需要的可能条件。研究的结果,认为当时已具备了下列 4 项条件:(1)已经能够发射宇宙飞船,使之进入设计轨道,并可以达到这样的程度:拦截月球发射的运载火箭。这就是说,大型运载火箭的发射技术已经成熟。(2)已经能够生产出在外层空间运行几个月的自动控制宇宙飞船,其推进器的操控能力相当准确。这就是说宇宙空间中的飞船运行技术已经成熟。(3)已经能够确定宇宙飞船的飞行轨道。这就是说弹道线路分析和轨道测量系统已经成熟。(4)地面与宇宙飞船的通讯系统相当良好,数据相当准确。这就是说,通讯系统技术已经成熟。这些就是 20 世纪 60 年代开始时的物理、技术环境。而在经济上条件也已经成熟,国会拨款 200 亿美元,动用人力 50 万,管理的条件、立法的条件都可能具备。在需要与环境研究的基础上,系统工程师便确认了系统的目标。这个目标一开始在这个大型系统工程的管理人员之间是没有分歧的,对它的具体化也较容易取得一致的意见,因为这项工程的问题是有明

确定义的。

2. 目标选择与评价标准的确定

目标选择是问题定义的逻辑结果。有什么样的需要和有什么样的条件,就决定了我们的目标。正是目标选择引导到对各种为达到目标的替代性方案的研究,并提供评价选择最优系统的标准。例如它要求被选系统必须具有明确性(概念明确、具体并尽可能单一)、可计量性(尽可能做到定量分析)、适当的敏感性(即输出对输入的敏感性,以便控制输入能达到最佳的输出)等等。

以阿波罗登月系统工程为例,有了需要和可行性条件的分析,就能确定或确证一个目标:在10年内把人送到月球表面并安全返回地球。为了达到这个目标,就有下列几个对系统的评价标准:(1)可靠性标准:宇宙飞船设计中一般有好几个乃至十几个电子零件,每个零件不合格的概率虽然很小,但总起来却很大。宇宙飞船每次失败都是因为某个零件发生故障,所以可靠性标准是工程自始至终必须严格加以注意的标准。(2)稳妥性标准:只有稳妥的设计才能保证安全可靠,使飞船飞行成功。这就要求尽可能使用经过飞行检验的硬件,并使用非常巧妙的技术进行新设计,以便将设计中出现的未知数减少到最低限度,而新的设计和新的技术又必须在地面上做了大量试验才能使用。(3)简单性标准:只有简单的设计才能最大限度地减少零件、工作方式和接口。(4)后备能力标准:一切主要功能的实现都应该有后备能力或备用方式来加以维持。特别是通讯和动力系统应有备用系统,如太阳能电池不能自动打开,就应有一些装置可以用手动打开。(5)接口设计标准:在宇宙飞行中部件与部件之间、系统与系统之间、人与人、人与机器之间的接口(又称为分界面)十分重要。否则整个系统就会运转不灵。当然评价标准还包括例如成本、重量、各种性能制导的精度、通讯跟踪的精度等等。以上就是阿波罗登月系统工程的目标选择和某种评价标准。

选择目标和评审标准构成系统工程决策过程的第一个方面,它为系统工程师构造一个理想系统。霍尔说:“系统工程师在某种意义上是个梦想家,他用在物理上和经济上可行的东西和他所期望将来能够实现的东西来描绘一幅梦幻图景。理想系统正是由一组愿望推理或者我们所称的目标来加以描述的,这些目标包括重量、成本、安全性、耐久性、风险等物理的、经济

的和社会的目标。”^①

3. 系统综合

程序1和程序2向我们说明系统工程是什么,系统的任务是什么,必须适应什么环境,它追求的目标是什么,只解决一个“这件工作是什么”(What the job is)的问题。当然,这个问题很重要,因为正确地提出一个问题往往是解决问题的一半,但毕竟还没有讨论怎样解决问题,怎样做这件工作(How to do this job)。从系统综合开始,我们就要讨论系统工程怎样做的问题。首先就是系统综合。所谓系统综合就是根据系统的目标和标准提出一组可供选择的方案。其所以叫做系统的综合,是因为提出一组可供选择的方案没有逻辑通道可循,但又不是突然灵机一动的产物。一方面,是从先前人类知识中普查、综合出来;另一方面,要高度发挥想像力和创造性,才能做出新设计

以阿波罗登月系统工程为例。这个系统工程的主要任务是设计登月飞行本身。有许许多多方案可以达到这个目的。我们应该尽量将它们提出来,将它们考虑到。下面便是各种方案的例举:

(1)无交会点的直接登月方案:用足够大的三节火箭,叫做“新星”(NOVA)号,将大约有15万磅重的太空船送上太空飞向月球,当它飞近月球时,太空船会进入环绕月球的一条轨道,然后开动后退火箭在月球表面软着陆。待勘探月球的任务完成后,在太空船中开动引发火箭返回地球。这个方案的优点就是减少接口的不安全性,但缺点是要制造一枚比世界上动力最强的火箭土星五号动力还大一倍的火箭(推动力为13000万磅力),就像建造一座华盛顿纪念碑那样重的家伙、要它降落到它的台阶上一样。

(2)地球轨道上会合方案:用较小火箭,例如现有的土星五号,将太空船的组成部分分开发射到地球轨道上,在太空中在地球轨道上将它们装配起来。它的优点是所用的火箭动力小,缺点是分开发射,时间上配合不能差之毫厘,否则在太空中就失之千里,合不拢。

(3)一次会合的“加油飞机”方案:先送一枚无人驾驶的携带液氧贮箱的“加油飞机”火箭进入地球轨道,然后用一枚土星五号火箭将太阳神太空登月船也送上地球轨道,登月船利用“加油飞机”作为“轨道加油站”。登月

① Arthur D. Hall, *A Methodology Systems Engineering*, D. Van Nostrand Company INC. 1962, p. 91.

船和加油飞机衔接,注满火箭燃料,然后与加油飞机分离直接飞往月球。它的优点是加油飞机供给全部额外燃料,不必从发射台与登月船一起发射上去,因而可使用土星五号已有火箭,不必设计大火箭。其缺点是,空中加冷却液体氧是一件复杂而又危险的工作。

(4)“月球表面会合”方案:首先用火箭将一艘载有额外燃料和供应品的无人驾驶太空船送往月球表面,等宇航员直接飞行登陆月球后在返航地球前加添在月球上已预备好了的燃料和供应品。但问题是无法预知这些燃料和供应品在月球上是否完好无缺,也可能这些燃料和供应品离载人登月上着陆的地方很远。

(5)当科学家和政府领袖在上述四个方案中试加选择时,一名太空署工程师约翰·霍贝尔特(John. C. Houbelt)提出了第五个方案“月球轨道会合”方案:从地球上发射一支土星五号火箭,将载有三名宇航员的太阳神太空船发向月球,太空船绕月运行,太空船再发出一艘载二个宇航员的小登月艇,到达月球表面考察后返回太空船,丢掉登月艇,开动太空船返回地球。它的优点是要比直接登月节省许多燃料和重量,缺点是月球轨道上的对接会合是否过于冒险还是个问题。

这就是系统综合的阶段。

4. 系统分析

所谓系统分析,就是依照系统的目标和标准对各种替代性(试探性)方案进行分析。这里所谓的分析,就是从每个方案中进行种种推理,推演出种种结论,并将这些推理和结果与系统目标进行比较,看它们在什么程度上实现这些目标,同时在各方案的结果之间进行比较,为下阶段最优系统的选择打下基础。将系统的目标与系统方案的推理或结果进行比较要求十分细心,因为一个将要实行的方案常有许多预料不到的结果。例如美国航天飞机挑战者10号右侧的固体火箭发动机后部连接处密封不好(密封圈失效),就使7名宇航员全部遇难,葬身火海,根本达不到宇航的目标和安全性标准。所以事先必须对系统能否达到指标做周密的分析。

由于系统分析比较复杂,因此常常要通过一定的数学模型进行。特别是成本效益的分析,兰德公司曾发展一种系统分析方法,来解决这个问题。

我们仍以阿波罗登月系统工程为例来说明系统分析与比较。在系统分析阶段,系统工程对五个方案进行比较,这种比较分别从技术因素、工作

进展、成本费用和研制难度方面进行。

在技术方面,从性能、制导精度、通讯跟踪方面进行比较,方案(1)最佳,而在飞行成功率方面,方案(2)、(3)最差,因为要进行几次对接,成功率仅有方案(1)的 $2/3$,在性能方面也很难提高。方案(5)在性能和飞行成功率上与方案(1)相等,但在通讯跟踪等方面又不如方案(1)。

然而在研制的难易程度上,方案(1)要研制大型运载火箭 NOVA,必须先制造一枚土星一号,然后再制造更大的“土星”,最后才做成 NOVA,这要许多年才能制成,而且这样大的火箭发射时作用于发射台的爆炸当量为 1000 万磅黄色炸药,发射台的建造又很难处理。方案(2)、(3)要研制土星五号火箭。不过这比较简单,因为现成的土星四号有一个空间可以放得下第五台发动机,成为土星五号,但除此之外还要研制贮箱系统、液氢液氧传输系统、大型登月舱,以及解决太空船与无人飞行器对接等技术问题。不过比方案(1)易行一些。而方案(5)比较简单,除土星五号之外,只需研究载人飞行器、登月舱和在月球轨道上的交接技术,所以比较起来是五个方案中最易行的一个。

再比较它们的工作进度和经费使用。方案(1)所需经费远远超过国会批准拨款的 200 亿美元,方案(2)、(3)也比较贵,而方案(5)所需经费据估计要比方案(2)或(3)低 10% 以上,而工作进度可比(1)、(2)、(3)提前几个月完成。

于是根据对各种指标的比较,可以得出结论,第五方案最能确保在最短时间最经济地达到阿波罗登月计划的全部目标。这就是由系统分析阶段转入最优系统选择。

5. 最优系统选择

依据系统目标和标准对各入选方案进行比较后选择其最优者,这是一个系统选择的思考过程。它不单纯是一个逻辑推理问题,而是将价值标准加于这个逻辑推理过程;它不是决策人瞬间的“拍板”行动,而是一个评价决策过程。在评价目标只有一个定量指标、且备选方案个数不多时,容易从中确定最优者;而当备选方案很多、评价目标有多个而且彼此又有矛盾时,要选出一个对所有指标而言都最优的方案一般是不可能的,这就必须在各个指标间进行协调,使用多目标最优化的方法来选出最优系统,使用统一的计量单位(如美元)来比较这些系统以求得最优者。在这里也有一系列数

学模型和数学方法帮助我们进行最优选择,如微积分中的最大值最小值计算、线性规划理论以及运筹学等等,而当备选方案的结果为不确定时,选择最优方案就有一个概率问题需要解决。

总之,最优系统的选择是系统工程的决策过程的第一个方面。决策过程的第二个方面是前面所说的系统目标选择。

当对多种方案只选择了一两种而其他的方案被淘汰掉时,如何对待那些被淘汰了的方案呢?(1)被淘汰的方案只是在目前的情况下试探性地被淘汰,当情况环境发生变化的时候,其中某些方案很可能是很好的候选方案。(2)被淘汰的某些方案的组成部分可以用来改进被选择的方案,例如香港科技大学的建校方案,虽然选定了该校建筑设计方案竞赛中取得第一名的图纸,但在计划施工时,在许多地方参考了取得第二名的图纸上的设计。(3)被淘汰的方案也是人们创造性思维的结果,即使被淘汰了也是有价值的。(4)对被淘汰方案的被拒绝理由必须客观地讲清楚,存而备考。

6. 实施计划

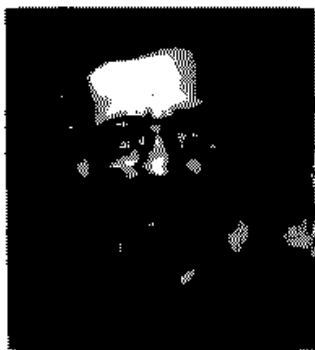
根据最后选定的方案组织系统的具体实施,还有一个继续研究的问题。如果认为问题不大就将方案略加修改,予以实施;如果发现问题很大,就重新返工,实施前面各个步骤。

►► 12.2 软系统方法的理论与实践

前面讲了20世纪60年代发展起来的系统工程方法,它的特点是能将问题定义为目标状态(需要和期望状态) S_1 和当前状态 S_0 的差距,问题求解就是选择方案最优地消除 S_1-S_0 的差距。这里目标是十分明确的,例如10年将人送上月球,5年将钢产量提高到年产200万吨等。目标明确,“做什么根本不成问题,系统工程的技巧只在于解决“怎样做”的问题,核心是最优化。这种系统工程还有另一个特点,就是它的目标、性能、达到目标的手段和最优方案的选择一般都能定量化。这样的系统叫做“有良好结构的系统”,这样的系统工程又叫做硬系统工程。军事系统工程一般是硬系统工程。

但是70年代以后,系统工程由军用转入民用,还要处理大量的所谓人类活动系统,它是由有自我意识并自由选择行动的人类行为组成的社会复

杂系统。如果这些系统存在着问题,它们就有自己的明显特点,这就是:



切克兰德
(P. B. Checkland)

(1)没有明确的目标和问题定义,即无良好结构。例如我们能为本单位做些什么,这个问题是明确的,有良好结构的。但下面的问题却是无良好结构的问题:“我们的单位,我们的企业有问题呀!经常发不出工人的工资,并且银行的欠款越来越多!但我不知问题在哪里,所以不知道做什么。在这里做什么甚至比怎样做更重要”这里的问题表现为一种使人不安的感觉,问题本身有待推敲,与问题相关的系统层次也不明确。(2)问题常常不能定量分析,硬系统工程的定量方法、优化方法用不上去。

为了处理这些无良好结构的非定量系统,英国的兰卡斯特尔(Lancaster)大学系统科学系切克兰德(P. B. Checkland)教授创造了一种软系统工程方法,已应用于几百个管理实例并取得成功。本节将介绍这种软系统工程方法的基本理论及其相关应用。

切克兰德软系统方法的基本步骤可以用图 12.1 来表示:

1. 无结构的问题情景。
2. 表达问题情景。

这两个阶段的特征都是表达问题,这是软系统方法论的开始阶段,任务是要收集尽可能多的问题情景。这里说的收集记录尽可能多的问题情景,是指记录我们感觉到但又不能表达和明确定义的那些问题。这些问题“不可定义”,但可认识,与其说它是有待解决的问题,不如说它是有待改善的状况,所以叫做表达出问题情景,包括记录问题情景中的结构元素和过程元素以及变化情况,尽可能描述它们之间的关系,就像切克兰德所说的“建立所研究情景的最充分的可能图像”,^①即要从各个不同角度来看这个系统,描述这个系统。这种描述最初应尽量是“中性的”,但到后来要突出描述者本人的世界观和他(或他们)的丰富的图像创意,将问题情景中引起争论的方面明确显示出来。

① P. 切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 206 页。

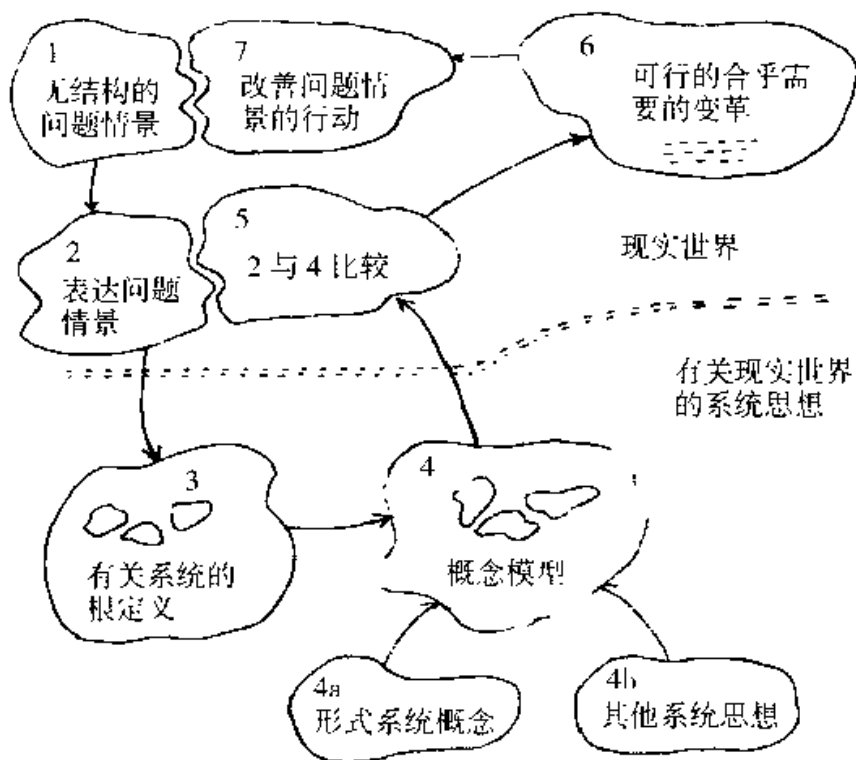


图 12.1 软系统方法的步骤和学习循环

例如英国有一家有 100 个雇员的小型纺织公司,叫做艾尔代尔纺织有限公司,它的业务是制造各种棉纱、麻线和绳子、天然的或人造的纤维产品。1969—1970 年间这个公司面临大问题:不能支付股东红利,濒于破产。切克兰德被邀请到这个公司进行研究,发现目标导向的硬方法不能用。先前有人用硬系统方法调查,做了一个咨询报告,花了数千英镑作出的建议是改变生产设计系统,但结果毫无效果,因为问题不在这里。切克兰德调查后认为,该公司活动的每一个方面都是一个潜在问题。生产计划安排混乱;各地销售代理人 与生产总部之间没有良好关系;分销店代理人只关心自己的事,没有关于该公司产品的生产成本和销售成本的金融信息;整个公司一层没有计划;整个群体上气低落……问题一大堆,连成一个整体,使公司走向破产,解决其中任何一个问题都没有什么作用。这里描述了整个问题的问题情景:找不到系统的目标,即使找到一个目标——公司要生存下去,但这个目标不能导引出什么方案与行动。这个阶段就是表述问题情景阶段。^①

① P. 切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 176—177 页。

表述问题情景后,下一步就是寻找一种观点来看这个公司,能够将公司看做与所有这些核心问题有关的系统。当然,可供选择的系统应该是很多的。

3. 作出相关系统的根定义(root definition)

在认定与我们所要解决问题有关的各种人类活动系统之后,我们从中选择一个或几个系统,对其做出“命名”或“根定义”。图 12.1 中步骤 3 的圈子里有几个小圈子,表明有多种不同的概念系统、不同的根定义可供选择。请特别注意切克兰德在这里呈现出来的关于系统的建构主义观点。这里所说的系统和根定义,属于主观世界的范畴,表达了一种特别的世界观,用之来把握问题情景的图像。根定义的目的是要运用某种思想观点来得到对系统根本性质的清楚简洁的陈述。切克兰德说:“所谓根定义,就是从某一特定角度对一个人类活动系统做出简要描述”。^① 它的目的自然是要抓住问题的本质与核心,抓住某人类活动系统的根本目的之所在。它通常可以表达为“输入”转变为“输出”的某种“变换”或“转换”。例如健康护理系统的输入是知识、仪器与设备、人力等等,而输出的是得到服务的人们、已满足的健康护理的需要等等。而健康护理系统可以定义为将这种输入转换为输出的机构。

又如,关于宗教问题,马克思做了一个简洁的描述:“宗教是被压迫生灵的叹息,是无情世界的感情,是无灵魂状态的灵魂,它是人民的鸦片”。^② 这个表述也说明了宗教的最根本的东西——转换作用。再如,对如何理解监狱,切克兰德提出这样的根定义:“监狱是一个惩罚系统、一个洗心革面的系统、一个威胁系统、一个保护社会免受攻击的系统以及一所罪犯大学”。这对于理解监狱的问题情景是很有帮助的。^③

对于前面所讲的使艾尔代尔纺织公司面临破产的一大堆问题情景,与这一大堆问题有关的公司的根定义是将公司看做是一个促使顾客对一系列纺织品进行订货,并进行某种技术操作使这些订货迅速得到满足的系统。根定义是:公司是一个引致订货并为此进行加工的系统。这些问题情景可

① P. 切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 208 页。

② 《马克思格斯恩全集》第 1 卷,人民出版社 1972 年版,第 2 页。

③ 转引自迈克尔·C. 杰克逊著《系统思考》,高飞、李萌译,陈剑校,中国人民大学出版社 2005 年版,第 180 页。

以由这个根本定义、根本概念逻辑地推演出来。抓住了根定义,就是将问题从感性认识提高到理性认识,抓住问题的本质。下一步就是从这个根定义导出有关系统的概念模型。

4. 构造和检验概念模型

当我们经过辩论与协商选定一个角度将某一个整体看成为“系统”之后,有两种可能的方法对它进行描述:(1)“状态”描述,即描述构成系统的元素、这些元素的当前状态、它们与影响系统的外部元素之间的关系以及这些外部元素的状态。(2)输入输出变换描述,即将系统看做是将输入变换为输出的功能系统。对于人类活动系统来说,进行状态描述是很困难的,因而主要是采用输入——变换——输出的框架进行描述。

软系统方法的第4阶段,就是将根定义转变为表示输入输出关系的系统模型。根定义描述了系统是什么,而系统的概念模型则描述系统必须做什么才能是这种定义所规定的系统。这个“做什么”就是将系统表述为有结构的活动的集合,这个活动集合是根定义在逻辑上所要求的。同样,系统模型也有多种方案可供选择,这一点也在图12.1第4步骤的圈子里用几个小圈子来表示。

所谓系统概念模型的检验(Testing),不是检验它正确不正确、有效还是无效,而是检查它是否经得起辩护推敲,有哪些欠缺与不足之处。这个检验是拿它与一般系统形式和其他系统思想进行比较。例如检查模型中演绎的量度是否清楚,按照这种量度什么是“好”的和“坏”的演绎,模型中的子系统是什么,系统的界线是否得到很好的确定,等等。这就是说,从理论上、逻辑上尽可能将系统的概念模型构造为一个不是草率的而是比较完善的经得起推敲和理论批判的模型,以便在第5阶段与现实的世界进行比较。以艾尔代尔纺织公司的问题情景为例,我们在上一阶段中已经找出了它的根定义,将公司看做是一个引致订货并进行加工以迅速满足订货需要的系统。按照这个定义,系统要做一些什么活动才会成为所定义的系统呢?这些活动是由一定的决策决定的。所以要建立的是这样一个系统概念模型,它将这些决策顺序的逻辑步骤列举出来、联系起来。于是切克兰德建立了一个下面的模型(见图12.2)。

图12.2给出了一个加工定货系统的概念模型,它由6种基本活动组成,这些活动以问题的形式被设想出来,并将这些活动划分为两个机构。这

些基本活动的关系用实线→和虚线-----表示出来。

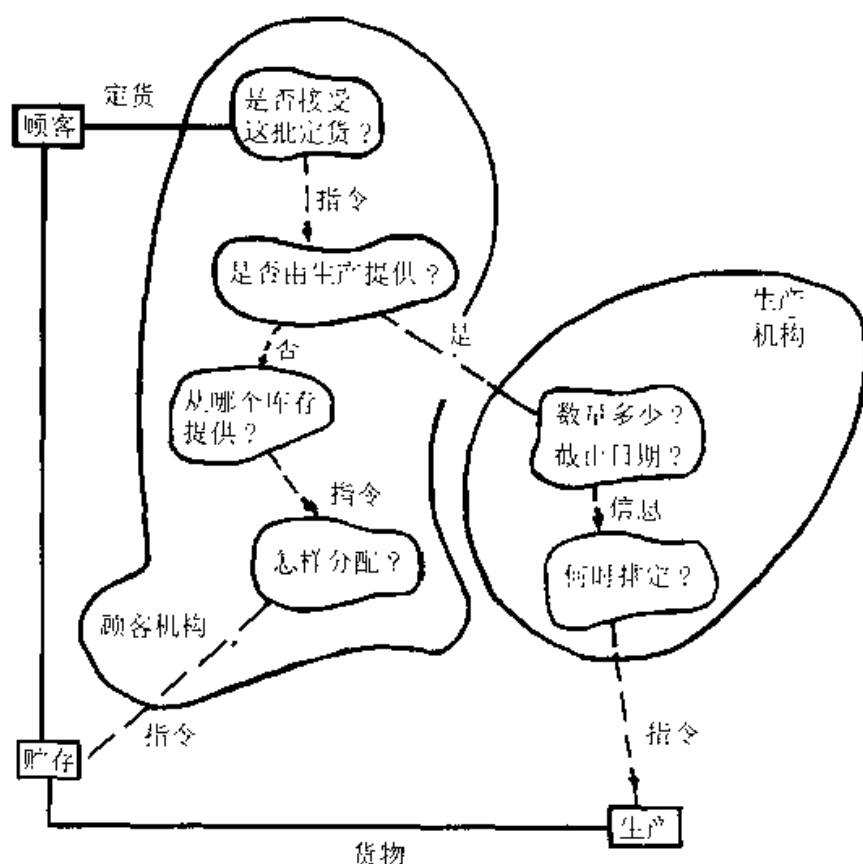


图 12.2 一个加工订货系统的概念模型^①

5. 概念模型与现实情景的比较

将现实世界中存在的问题情景和与问题有关的系统模型所具有和提示的情景进行比较,能为提出改革方案打下基础。这种比较不但在系统工程人员进行,而且要与问题情景中有关的人员共同进行,目的是引起一场关于改善问题情景需要做出什么可能的改革的讨论。如果认为找出了系统模型就能得出现实系统应该做什么的结论,那就太简单了。模型只能作为问题的源泉,不仅模型可以引导修正现实世界,现实世界也可能修正这个模型,经过讨论将会改善这个系统概念模型。例如艾尔代尔纺织公司的改革工作,在建立系统模型后,就以此作为问题源泉引起讨论。依据概念模型的

① 该图取自切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年版,第 213 页。

启示,他们建议建立中心计划室,行使概念性的“顾客机构”与“生产机构”所做出的决策,作为改革这个公司的一个组织措施。

6. 实施“可行的和合乎需要”的变革

在计划实施阶段,硬系统工作的目的主要是创造和实施一个最优化的系统,而软系统工作的目的一般说来是改进一个系统,缓和地变革它。这种变革可能是结构的变革,也可能是程序的变革,也可能是“态度”的变革。这里所以叫做“可行的”,切克兰德的解释是:“这在已知历史上、文化上和主要政治背景下是可行的”;这些所以叫做合乎需要,是“从系统上看是合乎我们所设想和需要的。”

这个不断循环的过程就是一个不断学习的过程,也是一个广义的管理过程,因为在切克兰德看来,管理就是妥善地处理相互作用的事件流,以图改进成问题的事态。这就是软系统工作方法的认识论基础,即以学习的范式来替代硬系统方法的优化范式。

凡布楼(Von Bulow)曾将软系统方法7个阶段的循环总结如下:“软系统方法论是旨在改进有关人类活动的社会领域的一种方法论,它包括一个理想地说来是永无止境的循环学习过程。这个学习是通过反复地使用系统的概念来反映与思考感性的现实世界,作用于现实世界,并进而再次地反映运用系统概念于现实世界所产生的结果而实现的。这个反映与思考是通过一系列系统模型来构造的。这些系统模型被看做是关于问题情景的某些方面的理想类型,而不是看做对它们的简单的描述。之所以是这样,那是因为这种方法论认为,对于问题的情景不可能提供一幅完全客观和完全完备的描述。”^①这个论述精辟地说明了软系统方法的实质。

►► 12.3 批判的系统思想方法

▷▷ 12.3.1 批判性系统思想的起源

我们在12.1中讨论了硬系统思想和硬系统方法,它适用于有良好定义

① P. B. Checkland, *Soft Systems Methodology Action*, John Wiley & Sons Ltd. Chichester 1990. p. 28.

的系统的设计、评价和实施。在这里成问题的不是系统的目的,而是达到目的的手段。但是在现实生活中这样的系统并不是很多,现实世界中充满着人们的利益和价值观念发生冲突的复杂系统。硬系统思想用功能主义作指导,假定世界是由可以被客观地进行研究的具有清晰目标的系统组成,结果将社会系统中的财富、地位、权力不平等的结构当做不必讨论的前提来接受,解决不了目的理性(系统的目的是否合理)和价值理性(系统的道德标准和行为规范是否合理)的问题。切克兰德的软系统方法论看出了硬系统工程方法的问题和界限所在。他摒弃了功能主义的立场,采取了社会学中的诠释主义的假定(interpretive assumption),强调不同立场、不同观点的人们用不同的系统观念来把握现象,导致在目的、手段之类的系统问题上出现重大的分歧。因此他提倡用公开的、自由辩论的进路以及反复循环的学习过程求得问题情景有所改进,以解决复杂系统的问题。切克兰德的工作显然是批判的系统思想方法的开端。

但是软系统方法也有它的问题和局限。M. C. 杰克逊指出:“在具有不平等权力资源的利益集团之间存在着基本冲突的地方,这种开放的参与性的辩论是不能有什么结果的,这时软系统思想或者从面临的问题情景中撤退,或者放弃自己的哲学原则去适应那种破坏相互沟通的限制辩论的情况”。^① 因此,要将批判精神进行到底,软系统工程的局限性也应受到批判。批判系统思想应该敢于面对那些权势不平等、利益不平等的现状,保证决策过程中的所有利益相关者能有所参与,特别是弱势群体的代表者有所参与,从而“致力于消除那些不合理的压迫社会中某些特定个体和群体的权力与统治根源”。^② 所以这种批判是“解放型”的。软系统方法恰恰忽视了这一点,于是就有解放型的和批判性的系统思想的兴起。当然并不是说,批判系统思想家们在实践上就一定能解决这类问题,例如解决某些政府要制造核武器问题或生产化学武器问题、某些建筑工程强行征地拆迁民房的问题,以及其他诸如此类的问题。但是他们重视这个问题,从系统理论上分析这个问题,从系统管理方法上尽量解决这个问题。

① M. C. Jackson, *Systems Approaches to Management*. Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2000, p. 356.

② 迈克尔·C. 杰克逊:《系统思考》,高飞、李明译,中国人民大学出版社2005年版,第203页。

在社会学理论上,批判系统思想方法与社会学家和哲学家哈贝马斯的理论密切相关。哈贝马斯特别强调交往理性或沟通理性(communicative rationality),即“行动者致力于达成对其行动情境和行动计划的理解,以便借助共识协调他们的行动”。^①他提出人类有三种理性:(1)工具理性(技术利益)。(2)实践理性(人类之间相互协调与沟通的利益)。(3)解放理性(以摆脱由权力关系施加于人们的压迫而获得自由的利益)。他警告人们不要受工具理性的支配,这三种理性都可以被批判地反思,都可以用“交往能力”(communicative competence)与“理想言说情景”(the ideal speech situation)来加以解决。这当然只是一种理论的论证,并与胡塞尔的现象学以及后现代的理论有关。从功能主义跃迁到诠释社会学,再跃迁到交往理性,为批判的系统思想方法奠定了一个哲学基础。

▷▷ 12.3.2 批判的系统启发法

W. 乌尔里克(Werner Ulrich)于1983年出版了《批判性社会规划启发法》(Critical Heuristics of Social Planning)一书,为批判性系统思想奠定了一个基础,因为它特别注意将前面12.3.1所说的批判实践理性和批判解放理性的哲学思想转变为一个可操作性的设计与规划的方法论。

什么叫做批判的系统启发法呢?所谓“批判”,就是要对人们寻求知识和追求理性的前提假定进行反思。为此,对于系统的设计者来说,必须使设计中的规范内容对自己和对他人来说都是透明的,以便人们可以对它进行批判性的检查、评价和争论。所谓“系统”,就是在规划设计中相关要素和相关条件的“系统整体性”。局部的最优化可能导致整体的非最优化,所以必须有一个全面观点,所以叫做“系统”。所谓“启发法”,就是提供一个具体方法帮助规划者和参与者对要讨论的问题及其先决条件进行批判性反思,永不允许系统设计者声称他们的设计是客观的结果。

批判性系统启发法的基本内容就是对社会系统设计做出一个“系统整体判断”,对哪些是系统的内部要素、哪些是系统的外部环境要素做出一个规定,所以又称为系统的“边界判断”。边界判断的第一组问题是角色问

^① 马尔科姆·沃特斯:《现代社会学理论》,杨善华、李康等译,华夏出版社2000年版,第48页。

题,涉及四组人员:当事人、决策人、设计者、见证人,代表四种不同角色。第二组问题是有关角色最关心的问题,依次是动机问题、控制与权力问题、专业知识问题、正当性基础问题。第三组问题是角色及其问题的边界。这样乌尔里克一共提出了 $4 \times 3 = 12$ 个问题,都以“应该是”的形式提出来。下面就是这 12 个问题:

1. 谁应该是被设计和改进的系统 S 的当事人,即受益者? 例如一个为老人提供住房服务计划的当事人或受益者是相关的老年人。

2. S 的目的应该是什么,它应能够达到什么目标状态? 例如这项老人服务计划应给老人有怎样的理想住房。

3. 衡量 S 成功或改善的标准应该是什么? 例如用什么标准来界定老人住房服务有所改善。

4. 谁应该是决策者,即有权改进和实施 S 的人? 例如在英国某项老人住房计划中,决策者就是某市或某区的住房与社会服务部。

5. 决策者应该控制 S 的什么要素(资源等)? 例如住房与社会服务部能控制的拨款有多少?

6. 哪些资源和条件应该是 S 环境的一部分,即不由 S 的决策者控制? 如老年人的照顾者或义工,他们不受 S 计划的控制,是 S 计划要考虑的环境。

7. 谁应该是 S 的设计者?

8. 哪些专门知识应该被汇集到 S 的设计之中,即应该将谁视为专家,他的角色应该是什么?

9. 谁应该是 S 的保证人(即设计者应该在哪里找到使其设计得以实施、使其标准得到落实、使其成功得到保证的人)?

10. 谁应该代表将会受 S 设计影响的人们的见证人?

11. 应该在什么程度上和用什么方式给受影响的人以承诺并实现这个承诺? 例如要给因建老人公寓而拆迁的人们以什么补偿之类问题。

12. S 的设计应该以相关的和受影响的人们的什么样的世界观和价值观为基础?

以上 12 个问题一开始就必须全部透明,完全公开,让当事人、决策人与设计者进行反思,特别要与受影响的人们进行充分对话,让所有参与者、相关者和受影响者都有权参与讨论与辩论。否则就应看做是“辩护中断”

(justification break-off)。决策人与设计者要对此负责。

这12条纲领的最主要精神是沿着“参与者的维度”推进系统思维,注意到可能存在的强制性压力并探索克服这种强制性的办法。其办法是:第一,允许提出反叛性的问题:谁可以从某种系统设计中获益?例如某个设计计划是不是使那些好大喜功的人们获益?某个开发区是否为官商勾结的结果?谁应该给那些受设计系统影响的群体授权参与决策?因此这个判断性系统方法论被称为解放型的;第二,尽可能使所有利益相关者参与到变革的辩论中来,并特别注意保护弱势群体,给与他们参与平等协商的均等机会,并以民主的方式进行辩论。总之,受到压制的观点应该得到伸张。

▷▷ 12.3.3 多元主义系统方法论

多元主义系统方法论是由 M. C. 杰克逊为首的英国霍尔大学系统管理学派和后现代思想家们提出来的。后现代主义者本来就是多元主义者,强调人们必须接受对世界的多元解释,并对各种差异表现出宽容的态度,学会在不可通约的范式之间和平共处,鼓励多样性和创造性。将后现代多元主义运用于复杂系统方法论的研究正在开始,概括他们的成果是一件很困难和很冒险的事,而且并非本教材所能容纳。而 M. C. 杰克逊等人早在 20 世纪 80 年代就提出从多元的角度批判看待各种系统方法,并在 90 年代在整合各种不同的系统方法论上做了非常杰出的工作。杰克逊将批判的系统方法论概括为三大特征:(1)批判的意识;(2)解放的和改进的承诺;(3)方法论层次上的多元主义。他赞成并支持批判性的系统启发法,正如我们在 12.3.2 所看到的那样,体现了一种批判的意识和解放的精神。杰克逊等人提出了“系统方法论系统”(System of Systems Methodologies,简称 SOSM),不仅强调了它的系统的批判性和解放性,而且强调了它的多元性。

前面讲过,切克兰克发现硬系统方法——包括运筹学、成本效益系统分析和系统工程学等学科——只适合于人们需要设计和实施的目标明确、即在相关人员中都有一致的意见、从而有确定的定义和良好的结构的系统。这些系统由于参量比较简单,因而最适合建立数学模型,用数学方法获得优化解。一旦超出了这个范围,硬系统工程方法就不能适用,发生了危机,需要由别的系统方法论来加以代替。杰克逊使用了两条坐标对系统问题的情景加以延伸,看看当出现新的问题情景时会有什么新的系统方法范式突现

出来处理新问题。第一条坐标或维度表示按系统的问题情景的复杂性程度。在杰克逊的矩阵中,表现为一条由下而上的纵坐标。于是问题的情景或目标的明确度可以划分为两类:一类是简单的,另一类是复杂的。当然这是一个相对的和程度大小的概念。所谓复杂性程度高,正如我们在第6章和第7章中看到的,它是指子系统的数量越来越多,它们的目标以及它们之间的关系越来越多样,它们之间的相互作用的结果越来越不能确定,越来越不可预测,并随环境的变化而变化。在管理上不可以建立严格的参量不多的数学模型。第二条坐标或第二个维度表现了系统的问题情景的参与者的关系情况,用一条由左至右的横坐标来表示,它划分为三段,即(1)“单元型”(unitary)。属于单元型关系的参与者具有相同或相似的价值观、信念和利益,有共同的目标。例如在战争的一方中,军事目标、任务是一致的。例如第二次世界大战中美国罗斯福总统下令制造第一颗原子弹时,军方、科学家、工人毫无异议。(2)“多元型”(pluralist)。多元型关系参与者虽然有基本利益的相似性,但没有相同或相似的价值观和信念,局部利益不一致,甚至发生冲突。于是就可能和需要有相当的争论与辩论的空间,以便通过协商求同存异,调和妥协,使系统的问题情景获得改善。(3)“强制型”(coercive)。所谓强制型关系,就是参与者很少有共同利益,一部分强势群体或个人强制他人接受自己的意见。参与者之间发生价值观和信念上的根本冲突。于是系统复杂度的二分和参与者关系的三分,便组成了六种不同的“理想类型”:简单/单元型、简单/多元型、简单/强制型、复杂/单元型、复杂/多元型、复杂/强制型。这里所谓“理想类型”,是社会学家马克斯·韦伯的术语,指的是人们建构的一种抽象的理论模型,现实世界在多大程度上适合于它的前提,就在多大程度上适合于它的结论。关于系统的问题情景分类,可以用图12.3、12.4表示。

由于问题情景不同,适应不同情景的系统方法就各不一样。在本书第11、12章所讲到的有关组织与管理的各种系统观点和系统方法,便各有各的用处,各有各的局限。这些系统思想和系统方法包括硬系统方法、软系统方法、批判的系统启发法、活系统组织控制论、复杂性管理方法以及我们没有讲到的系统动力学和后现代系统方法等等,都会相应地落入杰克逊的问题情景空间。系统管理方法只能是多元主义的,不同的系统方法是相互补充的,而不是相互排斥和相互竞争的。这种情况可由图12.4表示出来:

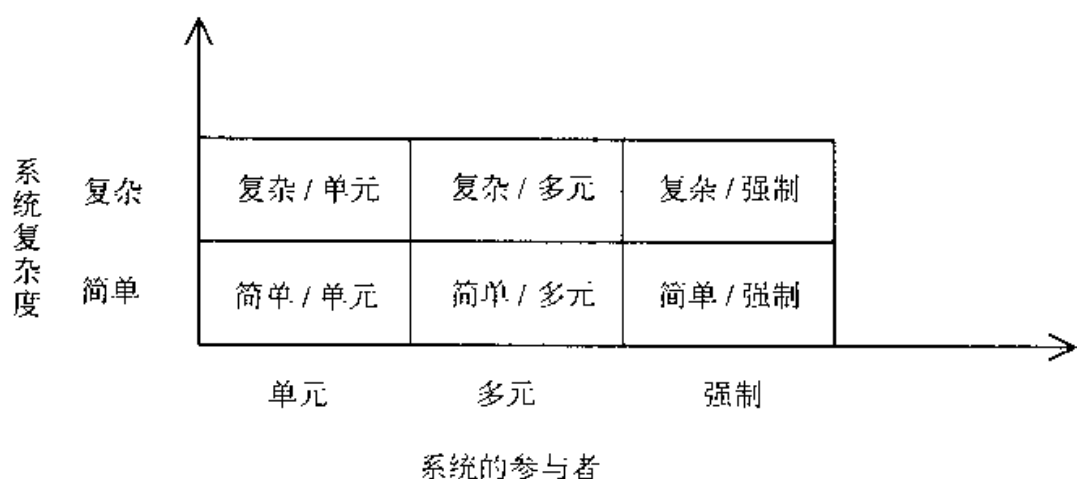


图 12.3 系统问题情景的 6 种理想类型

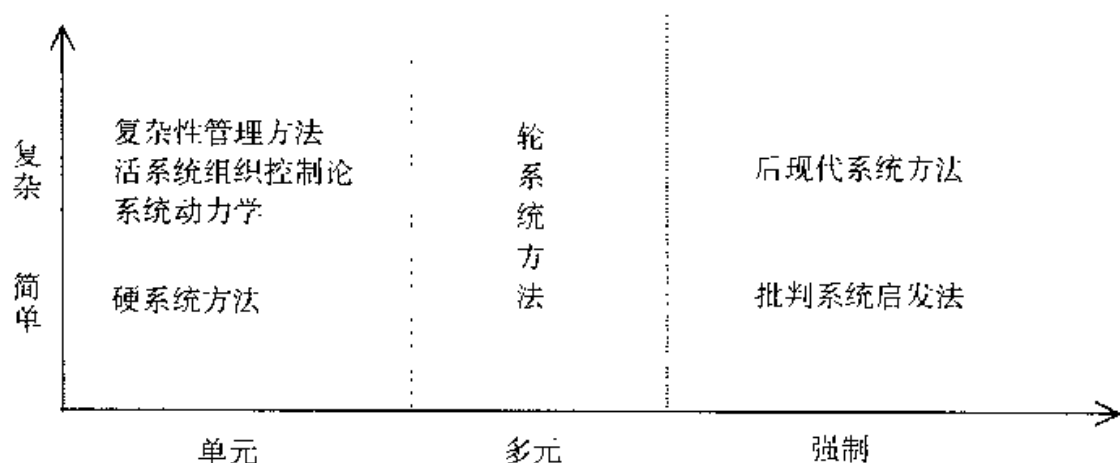


图 12.4 与问题情景相关的系统方法

对于这种诸多类型的系统管理方法论,我们不能采取霸权主义的态度,不能只承认和信奉其中一种,拒绝其他的范式和学派,否则会导致系统管理学科的分裂。同时,我们也决不能采取殖民主义的态度,将所有其他不同学派不同类型的系统方法论,削足适履地塞进自己所偏爱的系统方法论中,因为它们有不同的范式和各自的优点,而且现在不存在一种统一的系统管理方法论能将其他系统方法论作为特例而推导出来。大统一理论是不存在的,至少现在不存在,也看不到它将来会存在的苗头。同样,对于诸种不同类型的系统管理方法论也不能采取实用主义的态度,将它们只看做工具箱来使用。当然,对一切有用的东西都可以采取拿来主义。但拿来并不否认

它赖以存在和发展的脉络。我们要用整体主义和系统主义的观点看待它。根据后期库恩的观点,不同范式之间并不是完全不可通约的,而是局部可通约的,因此,拿来主义是可能的。由于多元的系统科学方法论是在更高的层次上,即在哈贝马斯关于人类活动的三种理性的基础上统一起来,所以多元主义与整体主义是不矛盾的。这些就是我们赞成杰克逊的多元主义系统方法论的理由。

后 语

本教材经过四年的收集资料、分析归类、综合整理和努力建构,终于完成了第一版,现在到了应该归纳出一些论点的时候了。不过我们却不想理出一些什么结论来,这个工作似乎应该由读者去做。我们要做的是总结性地理出一些问题来。由于知识基础的局限,我们提出的问题可能大多数是哲学性的。

1. 关于贝塔朗菲和波格丹诺夫以及一般系统论在系统科学中的地位

贝塔朗菲由于20世纪30年代发表的演说、40年代发表的论文以及60年代出版的著作《一般系统论:基础、发展和应用》,被公认为一般系统论的创始人。他对系统科学的主要贡献是什么?是因为他有力地论证了科学的同构性、从而使人们确信有一门新类型的学科存在呢,还是因为他的“开放系统”概念和提出了生物体及一般有机系统的数学模型,才被公认为一般系统论的创始人?西蒙曾经说得很妙,他认为到了60年代,70年代,“一般系统论由于缺乏切实的科学成果而濒临死亡”(3.6.1)。这个评价对吗?自组织理论、混沌理论和复杂系统理论是不是一般系统论包括控制论的逻辑引申呢?难道我们不可以将混沌理论看做贝塔朗菲一般系统方程的叠代处理吗?另外,波格丹诺夫的《组织形态学》一书早在20世纪20年代就提出了一般组织学(tektonology)的历史必然性和可能性,在经过60年的石沉大海后,在什么意义上他可以成为一般系统论的真正创始人呢?他的理论与贝塔朗菲的理论有何异同,今天又有何意义呢?

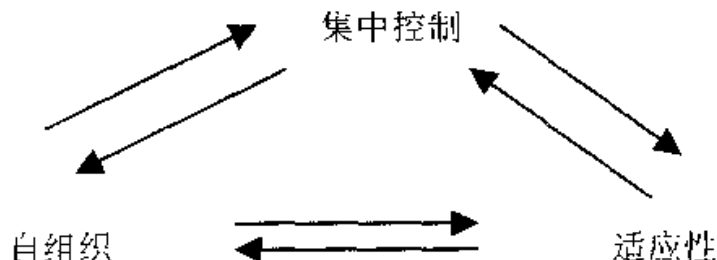
2. 关于控制论在系统科学中的地位

控制论创始人之一 W. R. 艾什比在系统运动中具有首要地位,他的《大脑设计》(1952)和《控制论导论》(1956)突出了控制论,并将控制论与一般系统论和信息论融为一体。《控制论导论》一书长期起到系统科学标

准教材的作用,一直到现在还有一些学派,例如现在布鲁塞尔的 F. 海里津和美国 V. 图琴都以控制论为基础讨论系统概念和系统科学。除工程控制论等应用控制论外,控制论基本上属于系统科学的理论领域。就本书所论及的不同层次和方面来看,有一般控制论和更一般的二阶控制论;在复杂系统的控制方面有生物控制论、感知与行为控制论;而在复杂系统管理论中,又有组织控制论和活系统理论。控制还属于下向因果关系的一种形式,并且又有集中控制与分散控制(分布式控制)的区别。如何将各个不同层面的控制原理做统一的研究呢?能够由此发现一些系统科学的新特征和新规律吗?我国著名科学家和工程控制论专家钱学森院士曾不遗余力地推广我国的系统科学研究,有着不可磨灭的功劳,不过在他的系统科学的分类体系和研究纲领中,将控制论一再列入技术科学而不是基础科学的范畴,^①如何评价控制论在我国的研究得失?

3. 关于复杂系统运行、突现和演化的机制

总结各个学派的研究成果,我们提出了三大机制的观念,即多层次集中控制机制、系统自组织机制和适应性进化机制。那么,这三种机制之间的相互关系如何,特别是多层次的集中式控制和自组织的分布式控制的关系如何,它们各解决什么问题和应用到什么领域呢?怎样解决其中的脑妖悖论和民主悖论?它们在组织管理学上又有何意义呢?自组织和“盲目的变异与适应性保存”的广义进化机制之间的关系又如何?在什么情况下,考夫曼关于没有自组织适应性进化的概率就是零(狂风将垃圾组成一架波音飞机)的论点是成立的?我们可否绘出复杂系统演化的三机制图呢?下图是否成立?



^① 钱学森:《人体科学与现代科技发展纵横观》,人民出版社1996年版,第52页。

4. 关于简单性与复杂性以及复杂系统突现机制的统一表达问题

本教材第6章表明,复杂性是一个信息量的概念,是一个相对的范畴,首先是相对于简单性或简单系统而言,其次是相对于研究者在认识上要求什么样的粗粒化程度而言。在人的维度确定之后,从简单性过渡到复杂性的关键就是在特定条件下的叠代。混沌理论表明,最基本最简单的函数经反复叠代就会出现极为复杂的函数及图形,元胞自动机从最简单的元胞、最简单的关系和最简单的规则在一定条件下反复叠代,就可模拟生命甚至可以穷尽地模拟宇宙已有的一切复杂性和多样性。在人群中,自利的个人之间简单的对策只要重复(叠代的)博弈就会产生各种复杂的社会合作和社会结构。复杂的神经网络产生的原理也是一样。我们是否可以归结为一个公式:在混沌边缘上,复杂性 = 简单性 + 叠代? J. H. 霍兰似乎正是抓住了这一点,将适应性行动主体的功能表现为简单的行为规则,即转换函数: $S(t+1) = f(I(t), S(t))$, 将行为主体之间的相互作用表达为界面函数 $I_{ij}(t) = g_{ij}(S_n(t))$ 。主体状态转换、主体间的相互作用可以是局域的,并且是简单的,但通过将时间 $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ 叠代代入后就会生成极为复杂的系统模式、结构与功能。这里主体间的相互作用,即输入 I_{ij} 可以是控制者,可以是环境,也可以是自组织相互作用。由此便将上面第3点讨论的复杂性系统突现的三大机制统一表达为一个受约束生成过程的公式。这就是复杂系统突现与演化的基本定律。如何在霍兰公式或其他一般公式基础上进行精确表达,并由此推出三大机制,也许是系统科学要进一步研究的关键问题。

5. 复杂系统突现与演化的决定性、非决定性和不可预测性

系统科学各个学派往往从不同角度用不同的概念对同一问题进行讨论。在9.4.1中我们讨论开放系统耗散结构的自组织,有一个涨落与分叉的问题,由于系统越来越远离平衡态,当达到一个分叉点时,系统到底选取 L_1 稳定态还是 L_2 稳定态, BZ 反应到底采取左螺旋还是右螺旋,贝纳德元胞流体宏观流动的方向到底是顺时针还是逆时针,是完全随机的、偶然的,决定性的宏观系统方程无法预言系统的历史。转向微观分析也无济于事,因为 L_1 与 L_2 是完全对称的。决定论方程无法支配与先前状态无关的随机性

导致系统的不可预测。这就是普利高津和哈肯的结论(哈肯用了几种序参量的竞争来说明这个问题)。转到混沌理论的研究,我们更加系统地看到“相控、分叉与层叠”一直走向混沌,吸引子在分叉点上不断发生裂变。1分为2,2分为4,分裂的速度成指数增长,很快达到无限,进入了混沌。这里决定性的方程直接导致混沌区内的“内在随机性”,从而达到不可预测性。各种不同的函数叠代以及在复平面上的分形这些性质完全不同的函数出现同样的现象,而元胞自动机和人工生命从另一角度讨论同样的问题。随着朗顿的 λ 参量的增长,系统状态从静止稳定态到周期态再到复杂态而进入混沌。这就提出了一个问题,不同领域的复杂性演化从单一稳定态到达分叉、层叠进入混沌,或者反过来走出混沌,有何共同规律和不同特点? 决定论、(外在)随机性、内在随机性、混沌性、不可预测性之间的关系到底如何?

复杂系统及其突现的不可预测性的根源何在? 盖尔曼一直强调自然界的量子力学规律和量子场论规律,本质上是概率性的,其概率为1是极小可能的,并至多是近似的。而宇宙的初始条件是非决定性的,加上海森堡测不准关系与混沌及其蝴蝶效应放大这种不确定性和非决定性,导致复杂系统及其突现,以及自然界历史的不可预测性。盖尔曼说:“宇宙的历史是由基本定律(所有物质及宇宙初始条件的动力学理论)以及不可思议的偶然事变的长系列的结果共同决定的。”^①这就是复杂性和历史的不可预测性的根源。我们对这种解释满意吗? 盖尔曼(及其夸克理论与复杂适应理论)、普利高津(及其自组织理论)和费根鲍姆(及其混沌理论)对不可预测性的解释有何异同呢?

6. 复杂性与科学的界限

复杂系统科学向我们表明,世界并不是完全可知的,更不是完全可以控制的,人类认识世界和处理世界的能力具有极大的局限。复杂适应系统包括人类在内都不过是一个收集信息和处理、利用信息的系统,复杂性的存在、不可计算性的存在、布莱曼极限的存在。艾什比必要多样性定律,混沌理论,蝴蝶效应加上宇宙的量子力学规律,测不准关系都说明了认识的极

① Murray Gell-Mann, "Fundamental Sources of Unpredictability". Talk at a conference with the same name held at SFI in March, 1996. <http://www.santafe.edu/~mgm/>.

限。我们注定对许多领域特别是未来的事件是无知的,这就是不可预测性的认识论根源。认识到这一点并不是消极的,因为人类的许多错误,特别是处理当代世界的事务,处理生态系统的危机以及在诸如此类的问题上所犯的错误大多数出自我们的自大狂,即对自己无知的无知。这个说法对吗?

7. 突现与还原

复杂系统科学认识论或复杂系统科学哲学的一个重要问题就是如何评价理论还原论。理论还原方法的局限性在哪里?我们是否需要用创造性的整体论和突现建构论来补充和发展还原论以便当我们要认识复杂系统时能够“上下而求索”(还原方法与整体方法的结合)、“左右而求索”(跨学科研究与整合)?这就遇到一个如何为包括整体论与还原论的系统思维进行辩护的问题。上向因果关系与下向因果关系以及同层因果关系这三种因果关系的理论成立吗?美国前任哲学学会会长金宰权(Jaewon Kim)消解上向因果关系和下向因果关系、只留下最低层因果关系的论断是否能够成立?为了对上述三种因果关系进行辩护,我们是否需要引进过程哲学和关系哲学来代替传统的实体论哲学?而为了为过程哲学与关系哲学进行辩护,是否需要引用当代的量子场论和规范场论呢?这就是一个从方法论回溯到认识论再回溯到本体论的问题。当代科学哲学和系统科学哲学对于突现与还原的大论战都是围绕这些问题进行的,我们是否应该参与这场世界性的哲学论战呢?

8. 隐喻与类比、模拟与模型

隐喻与模型方法的研究是系统科学的历史前奏曲,很可能成为系统科学方法论的大结局。既然是跨学科研究,就不可避免地要运用隐喻与类比方法,它是人类理解世界的一种重要的思维方式。但它是一种独立的思维方式吗?能否像现代归纳逻辑学一样,将类比看做是归纳方法的一种形式呢?类比方法与模型方法的具体表现及其在科学认识论上的地位问题是复杂系统科学与哲学的另一个重大问题,我们在本书第5章中论述了这个问题,又在本书的第11章中引用贝尔的活系统方法论论述了这个问题。其中对于隐喻、类比、模型、模拟、同构、同态之间的相互关系并无定论,如何进一步加以研究呢?

9. 系统科学体系及其与其他学科的关系

1981年我国著名科学家和工程控制论专家钱学森院士提出了一般科学技术体系和系统科学体系的二维结构。第一维次是科学的部门(门类)维,将科学划分为自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学和文学艺术。第二维次是将上述科学都划分为哲学、基础科学、技术科学、工程技术。^①在他的分类表中,将控制论、信息论、运筹学、巨系统理论都划归系统科学中的技术科学,只在系统科学的基础科学中留下了“系统学”。我们的系统科学体系的分类与钱学森教授的分类略有不同。首先,对于科学部门分类,我们采取了R. 罗森(Robert Rosen)的两个维度的分类法^②。第一个维度是关于事物性(thinghood)的科学,如物理学、化学、生物学、经济学、社会学、心理学、认知科学、组织行为学等传统科学分类。第二个维度是关于系统性(systemhood)的科学,即关于事物之间的同构关系、事物是以怎样的方式组织起来的科学,它是系统科学的研究对象。(当然罗森还指出还有另一个维度的科学,即关于“集合性”的科学,这就是各门类数学。在此我们就不谈了,暂且将它归入第一维度,只是为了论述方便与简化。)我们提出的第三个维度的科学研究就是根据联合国教科文组织《关于科学技术统计资料国际化的规定》(1978年11月27日会议通过)^③将科学研究划分为基础研究、应用研究和开发研究。我们称它为科学技术研究的R&D维次。从本书的结构看,我们将系统科学的基础研究——相当于钱学森的系统科学的基础科学,划分为一般系统论、控制论、信息论、复杂性理论、非线性动力系统理论、自组织理论、复杂适应系统理论等学科。它们是系统科学的基础学科。至于系统科学的应用研究,我们认为应包括各门系统工程学、运筹学、系统决策科学、系统管理学、组织控制论、工程控制论、系统博弈论等等,总之,按联合国的文件,它们是“为了获得主要目的在于

① 钱学森等:《论系统工程》,湖南科学技术出版社1982年版,第266—267页;钱学森:《人体科学与现代科技发展纵横观》,人民出版社1996年版,第21—74页。

② Robert Rosen, "Some Comments on System and System Theory", From Int. J. Gen. Syst. 13, 1. 1986, Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.

③ 联合国教科文组织关于科学技术统计资料国际化之目的的规定,载于约翰·迪金森:《现代社会的科学和科学研究者》,张绍宗译,农村读物出版社出版,第218—220页。

应用(系统科学)新知识而进行的创造性研究”^①。我们大多数系统科学工作者,主要进行的就是这种应用研究。至于系统科学的开发研究,指的是用系统与系统技术和系统管理来解决的各种具体项目,例如关于企业的问题诊断等具体案例研究等。在英国兰卡斯特大学,切克兰德领导的软系统方法研究就做了几百项这样的开发研究。系统科学是跨学科研究,因此,系统科学各门类必须研究它们与传统科学(数、理、化、天、地、生、哲学社会科学等)的关系以及在传统科学中的应用。例如系统生物学、非线性物理学、复杂性数学、神经网络研究、系统社会学、经济控制论、复杂系统科学哲学等等,从系统科学与传统科学的关系来看,现代系统科学有几种研究进路特别值得我们注意:系统科学研究的管理学进路、生物学进路、数学和计算机模型进路、哲学进路。因此,我们需要三个维度的系统科学研究:(1)系统科学各门类维度;(2)系统科学的研究与开发(R&D)维度;(3)系统科学与传统科学的相互关系维度,各种复杂性与系统科学的研究都可以在这三维空间中找到自己的位置。同样在这三维空间中某个空位置都可以像化学周期表中的空位一样预言今后有某种系统科学的研究出现。

10. 系统科学与组织管理科学的关系

系统科学起源于生命科学与工程科学的跨学科研究。我们所关心的是,当代研究系统科学的学者主要是属于哪个专业领域的呢?根据2002年国际系统科学研究会年会(ISSS,在上海召开)到会的学者和所发表的论文(不包括来自大陆的)来统计,大部分是属于世界各国的管理科学系和管理工程系和研究单位,其次是属于计算机科学和认知科学领域。系统科学和系统实践的研究者为什么会发生这样一个重点转移呢?从组织管理的思想发展来说,它从工具理性发展到价值理性再发展到批判理性,近年再进一步发展到多元主义理性。这就是系统思想和系统方法发展的过程吗?

① 联合国教科文组织关于科学技术统计资料国际化之目的的规定,载于约翰·迪金森:《现代社会的科学和科学研究者》,张绍宗译,农村读物出版社出版,第219页。

参 考 文 献

一、外文图书

1. Alexander, J. McKenzie. "Evolutionary Game Theory", *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/game-evolutionary/>.
2. Alexander, S(1920). *Space, Time, and Deity*. Vol. 2. London: Macmillan.
3. Allen, Peter M. & et al, *Models of Evolutionary Self-Organization in Social and Economic Systems*. Cranfield University E-Press, April Press, 1990.
4. Aristotle, *Topics*. (350B. C) BookVI. Translated by W. A. Pickard-Cambridge. Part 13.
5. Ashby, W. R. "Principles of the Self-Organizing". in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. (2001) Kluwer Academic/plenum Publishers.
6. Ashby, W. R. *General Systems Theory as a New Discipline*. From Gen. Syst. Yearb. 3, 1. 1958.
7. Ashby, W. R. (1968). "Some consequences of Bremermann's limit for information processing systems". In H. Oestreicher and D. Moore (eds.), *Cybernetic Problems in Bionics*. New York: Gordon and Breach.
8. Ashby, W. R. *An Introduction to Cybernetics*. London Chapman & Hall LTD. , 1957.
9. Aulin, Y. *Cybernetic Laws of Social Progress*. Pergamon, Oxford, 1982.
10. Aulin, Y. "The Law of Requisite Hierarchy". *Cybernetes* 8. 1979.
11. Axelrod, Rober. *The Evolution of Cooperation*, 1984. 中译本见《对策中的制胜之道——合作的进化》, 吴坚忠译, 上海人民出版社 1995 年版。
12. Barnard, Chester. "The Functions of the Executive", in *Selected Writings on Management*. Harvard University, Cambridge, 1938. 中国对外翻译出版公司, 1988.
13. Beer, S. *Diagnosing the system for organization*. Wiley, 1985.
14. Beer, S. "The Viable System Model: its Provenance, Development, Methodology

- and Pathology". *Journal of the Operational Research Society*, vol. 35, 1984.
15. Beer, S. *The Heart of Enterprise*. Wiley, Chichester, 1979.
 16. Bertalanffy, Ludwig von. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller, 1968. 中译本见 L. 贝塔朗菲《一般系统论》, 社会科学文献出版社 1987 年版。
 17. Black, M. (1962). *Models and Metaphor*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
 18. Block, Ned. "What is Functionalism?" in *The Encyclopedia of Philosophy Supplement*, Macmillan, 1996.
 19. Boulding, K. E. (1956) "General Systems Theory. -The Skeleton of Science". In G. J. Klir. *Facets of Systems Science*. Kluge Academic / Plenum Publishers, 2001.
 20. Bremermann, H. J. "Optimization through evolution and recombination". 1962 In M. C. Yovits et al. (eds.), *Self-Organizing Systems*. Spartan Books, Washington, D. C.
 21. Brian Arthur, W. "On the Evolution of Complexity". In George Cowan et al. (ed) *Complexity: Metaphors, Models, and Reality*. Addison-Wesley, 1994.
 22. Bunge, M. *Philosophy of Science*. Dordrecht-Boston, 1998.
 23. Bunge, Mario. *A World of Systems*, D. Reidal Publishing Company, 1979.
 24. Bunge, Mario. *Scientific Materialism*. D. Reidel Publishing Company, chapt. 2, 1981.
 25. Campbell, D. T. "Evolutionary Epistemology", In P. A. Schilpp (ed.) *The Philosophy of Karl Popper, The Library of Living Philosophers*. 1974.
 26. Chase, W. P. *Management of System Engineering*. New York: Wiley, 1974.
 27. Checkland, Peter. *Systems Thinking, Systems Practice*. John Willy & Sons, 1981.
 28. Checkland, P. B. and J. Scholes, "Techniques in Soft Systems. Practice Part 4: Conceptual Model Building Revisited", *Journal of Applied Systems analysis*, Volume 17, 1990.
 29. Checkland, P. B. *Soft Systems Methodology Action*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1990.
 30. Cilliers, Paul. *Complexity and Postmodernism*. Routledge, 1998.
 31. Cowan, George. et al. (eds.) "Complexity: Metaphors, Models and Reality",

- SFI Studies in the Sciences of Complexity*. Proc. Vol xix, Addison-Wesley Publishing Company. 1994.
32. Dawkins, R. *The Selfish Gene*. New York; Oxford University Press, 1976.
 33. Decker, Ethan H. (2001), *Self-Organizing Systems: A Tutorial in Complexity*, <http://WWW.ncsl.ernet.in/kbcs/vivek/issues/13.1/sos/sos.html>.
 34. Dewey, John. *How We Think*. Lexington, Mass: D. C. Heath, 1910.
 35. Edmonds, Bruce. "What is Complexity?" F. Heylighen et al. (ed) *The Evolution of Complexity*. Brussels Free University.
 36. Emmeche Claus, Simo Koppe, Frederik Stjernfelt. "Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels". *Journal for General Philosophy of Science* 28, 83-119, 1997.
 37. Espejo, Raul. *The Viable System Model: A Briefing about Organizational Structure*. Syncho Ltd., 2003.
 38. Flake, Gary William. *The Computational Beauty of Nature-Computer Exploration of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*. The MIT Press, 2001.
 39. Flood, Robert L. & Fwart R. Carson. *Dealing with Complexity — An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. Plenum Press, 1993.
 40. Foerster, H. V. "On Self-Organizing Systems and Their Environments". in M. C. Yovites, S. Cameron (eds), *Self-Organizing Systems*, Oxford, London, New York; Pergamon Press, 1960.
 41. Frank Gregory, "Effect, Efficiency and Soft Models", *Journal of Operational Research Society*, Vol, 44. No. 4.
 42. Gell-Mann. "Nature Conformable to Herself", from John Wiley and Sons, Inc.: *Complexity*, Vol. 1, no. 4 (c) 1995/96. <http://www.santafe.edu/sfi/People/mgm/>
 43. Gell-Mann, M. "What is Complexity?" <http://www.santafe.edu/~mgm/complexity.html>.
 44. Gell-Mann, Murray. "Complex Adaptive Systems". in George A. Cowan and et al (ed.) *Complexity: Metaphors, Models and Reality*, David Pines, David Meltzer.
 45. Gleick, Jame. *Chaos: Making of a New Science*. New York; Viking Penguin Inc., 1988.
 46. Habb, D. O (1949). *The Organization of Behavior*. New York; Wiley.

47. Haken , H. *Synergetics*. Berlin; Springer, 1978.
48. Haken, H. *Information and Self-organization*. Springer-Verlag, 1988.
49. Hall, D. *A Methodology for Systems Engineering*, 1962, Printed in U. S. A. Princeton N, A. Van Nostrand.
50. Hesse, Mary. (2000), "Models and Analogies". in W. H. Newton-Smith (ed.) *A Companion to the philosophy of science*. Blackwell, 2000.
51. Heylighen, F. et. al (eds.) *The Quantum of Evolution*. New York; Gordon and Breach Science Publishers, 1995.
52. Heylighen, F. "Downward Causation", Principia Cybernetica Web, 1995.
53. Heylighen, F. "Definition of Fitness". (1996) <http://pespinc1.vub.ac.be/FITTRANS.html>
54. Heylighen, F(2002). "The Science of Self-organization and Adaptivity". *The Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford; EOLSS Publisher. <http://WWW.eolss.net>
55. Holland, John H. *Emergence*. Oxford University Press, 1998.
56. Holland, John H. *Genetic Algorithms*.
57. <http://plato.stanford.edu/entries/game-ethics/>
58. <http://website.lineone.net/~frank.smits/page3.html>
59. <http://www.arch.columbia.edu/DDL/cad/A4513/S2001/r7/>
60. <http://www.cems.uwe.ac.uk/lcsg/introchap.pdf>
61. <http://www.cs.stir.ac.uk/courses/31YB/>
62. <http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/W.Langdon/FOGP/index.html>
63. <http://www.idsia.ch/~juergen/bucketbrigade/bucketbrigade.html>
64. <http://www.measco.com/ocourse.html>
65. <http://www.santafe.edu/sfi/People/mgm/>
66. Jackson, M. C. *Systems Approaches to Management*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2000.
67. Jackson, Michael C. *Systems Methodology for the Management Sciences*. Plenum Press, 1991.
68. Jackson, Michael C. *Systems Thinking; Creative Holism for Managers*. P. John Wiley & Sons Ltd. , 2003. 中译本见迈克尔·C. 杰克逊《系统思考——适于管理者的创造性整体论》,中国人民大学出版社2005年版。

69. Jantsch, Erich. *The Self-organizing Universe, Scientific and Human Implication of the Emerging Paradigm of Evolution*. New York: Pergamon Press, 1980.
70. Jones, J. D. *Order - A Closer Look at Chaos*. (run-time book) 2005.
71. Jon Walker, *The Viable Systems Model--- A Guide for Co-operatives and Federations*. ICOM, CRU, CAG AND JON WALKER 2001.
72. Kauffman, S. A. *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press, Oxford, 1995.
73. Kauffman, S. A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
74. Kenneth. D. Boulding. *General Systems Theory - The Skeleton of Science*. From Manage sci. 2. 197. 1956.
75. Klir, G. J. *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.
76. Kornwachs, K. *A Formal Theory of Technology*. PHIL & TECH 4:1 Fall, 1998.
77. Krieger, David J, & Belliger University of Lucern/ Switzerland. *Introduction to Systems Sciences*. <http://www.unikk.ch/course/Seiten/intro.htm>
78. Kron, W. , Kppers, G. & Novotny, H. (eds): *Self-organization; Portrait of a Scientific Revolution*. Kluwer Academic Publishers, 1990. See <http://WWW.unikk.ch/course/seiten/lesson>
79. Laszlo, Ervin. *Systems Science and World, Drder*. Pergamon Press, 1983.
80. Laszlo, Ervin. *Evolution— The Grand Synthesis*, 1986. 中译本见《进化——广义综合理论》, 闵家胤译, 社会科学文献出版社 1988 年版。
81. Li, T. Y. J. A. York, "Period 3 Implies Chaos", *American Mathematical Monthly*, 82(1975).
82. Lucas, Chris. *Self-Organizing Systems. (SOS) FAQ* <http://www.calresco.org/sos/sosfaq.txt>
83. Mackie, J. L. , *The Cement of the Universe: A Study of Causation*. Oxford, U. K. ; Clarendon, 1980.
84. Mesarovic, M. D. (ed.) [1964]. *Views of General Systems Theory*. New York: John Wiley.
85. Miller, J. G. *Living Systems*. New York: McGraw- Hill, 1978.
86. Nicolis, G. and I. Prigogine. *Exploring Complexity*. New York: Freeman, 1989.

87. Parsons, T. *Family, Socialization and Interaction Process*. Glencoe. 111. The Free Press, 1955.
88. Parsons, T. *The Structure of Social Action*. New York; McGraw-Hill, Free Press, 1937.
89. Plotkin, Henry. *Darwin Machines and the Nature of Knowledge*. Harvard University Press, 1994.
90. Popper, K. *Objective Knowledge*. Oxford University Press, 1972. 中译本见《客观知识》,舒炜光等译,上海译文出版社1987年版。
91. Powers, W. T. *A Brief Introduction to Perceptual Control Theory*, http://home.earthlink.net/~powers_w/whatpct.html.
92. Powers, W. T. *Behavior: The Control of Perception*. New York; Aldine de Gruyter, 1987. 中译本见威廉·鲍威斯《感知控制论》,张华夏、范冬萍等译,广东高等教育出版社2004年版。
93. Powers, W. T. *Making Sense of Behavior*. Benchmark Publication Inc., 1998.
94. Robbins, Stephen P. *Organizational Behavior*. Prentice-Hall International, Inc., 1996. 清华大学出版社英文版。
95. Rosen, R. *Anticipatory Systems*. Pergamon Press.
96. Rosen, Robert. *Subunit and Subassembly Process*, J. theor. Biol. (1970) 28.
97. Rosen, Robert. "Some Comments on Systems and System Theory". in G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York; Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.
98. Rosenblatt, Frank. (1962) *Principles of Neurodynamic: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. Washington, D. C., Spartan Books.
99. Salmon, Wesley C. *Causality and Explanation*. Oxford University Press, 1998.
100. Schmidhuber, Jürgen. *A Local Learning Algorithm for Dynamic Feedforward and Recurrent Networks Connection Science*, 1(4):403-412, 1989.
101. Simon, H. A. (1962), "The Architecture of Complexity", Proceedings of the American Philosophical Society. in George J. Klir, *Facets of Systems Science*.
102. Simon, H. A. *The Sciences of the Artificial*. (3rd. edition) MIT Press, Cambridge MA, 1996.
103. Simon, Herbert. "Can There be a Science of Complex System?" In Yanner Bar-Yam (ed.) *Unifying Themes in Complex Systems*. New England Complex Systems

- Institute. Peruses Books, 2000.
104. Suppes, P. "Reductionism, atomism and holism". In *Parts and Wholes* (Proceedings of The International Workshop in Lund, Sweden), Vol. 1. Forskningsradsnamnden. Stockholm, 1983.
 105. Turchin, V. *The Phenomenon of Science, A Cybernetic Approach to Human Evolution*. New York: Columbia University Press, 1977.
 106. Turchin, V. *A Dialogue on Metasystem Transition*. Chapt. 3 in F. Heylighen, c. Joslyn & V Turchin (eds); *The Quantum of Evolution*. Gordon and Breach Science Publishers.
 107. Valen, L. Van. "A new Evolutionary Process". 1973. In *Towards a Theoretical Biology*, Waddington C. H. (ed.) Aldine, Chicago.
 108. Verbeek, Bruno. & Christopher Morris. "Game theory and Ethics", *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
 109. Waldrop, Mitchell. *Complexity. The emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Simon & Schuster Inc., 1992.
 110. Weaver, Werren. "Science and Complexity". *American Scientist* 36, 536. 1948. In G. J. Klir, *Facets of Systems Science*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.
 111. Weisskopf, Victor F. *Knowledge and Wonder* (Revised Edition). Doubleday, 1996. 中译本见 V. F. 韦斯科夫《人类认识的自然界》, 科学出版社 1975 年第一版。
 112. Wilson, E. O. *The Diversity of life*. Belknap Press, Cambridge MA. 1992.
 113. Wiener, N. *Cybernetics*, John Wiley & Sons, Inc, 1948.
 114. Wolfram, S. *Universality and Complexity in Cellular Automata*. *Physica D*, 10:1 - 35. 1984.
 115. Wright, Sewall. "The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution". In *Proceeding of the Sixth International Congress on Genetics*. 1932.
 116. Wright, Von. *Explanation and Understanding*. 1971.
 117. Wymore, W. *Systems Engineering Methodology for Interdisciplinary Teams*. New York: John Wiley & Sons, 1976.
 118. Yaneer Bar-yam, *Concepts in Complex Systems, Guide to Complex Systems. Concept*

Map System. <http://necsi.org:16080/guide/concepts/system.html>

119. А. А. Богданов /В. В. Попков, Г. Д. Гловели, В. Д. Мехряков
Издательство: Тектология——всеобщая организационная наука Финансы
Москва 2003.

二、中文图书

120. A. 拉波波特:《一般系统论》,钱兆华译,福建人民出版社 1994 年版。
121. A. 列尔涅尔:《控制论基础》,科学出版社 1981 年版。
122. A. 罗森勃吕特、N. 维纳:《模型在科学中的作用》,载于庞元正、李建华编
《系统论、控制论、信息论经典文献选编》,求实出版社 1989 年版。
123. E. 拉兹洛:《进化——广义综合理论》,闵家胤译,社会科学文献出版社 1988
年版。
124. L. 贝塔朗菲:《一般系统论》,秋同、袁嘉新译,社会科学文献出版社 1987 年
版。
125. M. 艾根, P. 舒斯特尔:《超循环论》,曾国屏、沈小峰译,上海译文出版社
1990 年版。
126. M. 盖尔曼:《夸克与美洲豹》,杨建邺、李湘莲等译,湖南科技出版社 2001 年
版。
127. Malcolm Waters:《现代社会学理论》,杨善华等译,华夏出版社 2000 年版。
128. N. 维纳:《控制论》,郝季仁译,科学出版社 1985 年版。
129. N. 维纳:《维纳著作选》,钟初译,上海译文出版社 1978 年版。
130. P. 卡洛:《生物机器》,科学出版社 1982 年版。
131. P. 切克兰德:《系统论的思想与实践》,左晓斯、史然译,华夏出版社 1990 年
版。
132. R. F. 迈尔斯编:《系统思想》,杨志信、葛明浩译,四川人民出版社 1986 年
版。
133. 斯泰西:《组织中的复杂性与创造性》,宋学锋、曹庆仁译,四川人民出版社
2000 年版。
134. W. R. 艾什比:《控制论导论》,张理京译,科学出版社 1965 年版。
135. 埃德加·莫兰:《复杂思想:自觉的科学》,陈一壮译,北京大学出版社 2001
年版。
136. 埃德加·莫兰:《迷失的范式:人性研究》,陈一壮译,北京大学出版社 1999

- 年版。
137. 埃尔温·薛定谔:《生命是什么》,罗来欧、罗辽复等译,湖南科技出版社 2003 年版。
 138. 艾什比:《大脑设计——适应性行为的起源》,乐秀成、朱熹豪等译,商务印书馆 1991 年版。
 139. 保罗·A. 萨缪尔森、威廉·D. 诺德豪斯:《经济学》,胡代光译,北京经济学院出版社 1996 年版(第 14 版)。
 140. 贝塔朗菲:《一般系统论:基础、发展和应用》,林康义、魏宏森等译,清华大学出版社 1987 年版。
 141. 大卫·吕埃勒:《机遇与混沌》,刘式达、梁爽、李缜林译,普林斯顿科学文库 3,上海科技教育出版社 2001 年版。
 142. 戴文赛:《试论物质系统的层次》,载《自然辩证法研究通讯》1965 年第 4 期。
 143. 丹尼尔·A. 雷恩:《管理思想的演变》,赵睿等译,中国社会科学出版社 2000 年版。
 144. 恩格斯:《自然辩证法》,见《马克思恩格斯选集》第 3 卷,人民出版社 1972 年版。
 145. 弗里蒙特·E. 卡斯特、詹姆斯·E. 罗森茨韦克:《组织与管理——系统方法与权变方法》,李柱流等译,中国社会科学出版社 1989 年版。
 146. 郭爱克:《脑的复杂性与创造性思维》,见《复杂性探索》,民主与建设出版社 1999 年版。
 147. 哈肯:《协同学导论》,徐锡申等译,北京原子能出版社 1984 年版。
 148. 哈罗德·孔茨、西里尔·奥唐奈、海因茨·韦里克:《管理学》,张晓甘、陶新权、马继华、金晶鑫译,贵州人民出版社 1982 年版。
 149. 郝柏林:《自然界中的有序和混沌》,载《百科知识》1984 年第 1 期。
 150. 郝柏林:《混沌与分形》,上海科学出版社 2004 年版。
 151. 赫尔曼·哈肯:《协同学:大自然构成的奥秘》,凌复华译,上海译文出版社 1995 年 10 月版。
 152. 霍布斯:《利维坦》(1650),见周辅成编《西方伦理学名著选辑》上册,商务印书馆 1996 年版。
 153. 卡尔·米切姆:《技术哲学概论》,殷登祥、曹南燕等译,天津科学技术出版社 1999 年版。
 154. 邱芷人:《阴阳五行及其体系》,台北市,文津出版社 1998 年版。

155. 李国钢、邓志刚:《管理系统工程概念》,中央广播电视大学出版社 1992 年版。
156. 李约瑟:《中国科学技术史》(第 2 卷),科学出版社、上海古籍出版社 1990 年版。
157. 里查德·道金斯:《自私的基因》,卢允中、张岱云译,吉林人民出版社 1998 年版。
158. 林益等:《系统科学研究的过去、现在与未来》,载《农业系统科学与综合研究》,2000。
159. 刘华杰:《分形艺术》,湖南科学技术出版社 1998 年版。
160. 刘式达、刘式适编著:《非线性动力学和复杂现象》,气象出版社 1989 年版。
161. 马克思:《资本论》第一卷,《马克思恩格斯全集》第 23 卷,人民出版社 1972 年版。
162. 玛格丽特·波洛玛:《当代社会学理论》,孙立平译,华夏出版社 1989 年版。
163. 迈克尔·C. 杰克逊:《系统思考——适于管理者的创造性整体论》,高飞、李萌译,中国人民大学出版社 2005 年版。
164. 迈克尔·J. 贝希(1996):《达尔文的黑匣子》,邢锡范译,中央编译出版社 1998 年版。
165. 苗东升:《系统科学精要》,中国人民大学出版社 1998 年版。
166. 苗东升:《系统科学的难题与突破点》,载《科技导报》,2000—7。
167. 苗东升编著:《系统科学原理》,中国人民大学出版社 1990 年版。
168. 尼科里斯、普里高津:《探索复杂性》,罗久里、陈奎宁等译,四川教育出版社 1986 年版。
169. 庞元正、李建华编:《系统论、控制论、信息论经典文献选编》,求实出版社 1989 年版。
170. 朴昌根:《系统学基础》,四川教育出版社 1994 年版。
171. 普利高津:《从混沌到有序》,曾庆宏等译,上海译文出版社 1987 年版。
172. 钱学森等:《论系统工程》,湖南科学技术出版社 1982 年版。
173. 钱学森等:《论系统工程》,湖南出版社 1988 年版。
174. 乔治·威廉斯:《适应与自然选择》,陈蓉霞译,上海科学技术出版社 2001 年版。
175. 市川淳信:《系统科学》,载《世界科学》1981 年第 10 期。
176. 西蒙(司马贺):《人工科学:复杂性面面观》,武夷山译,上海科技教育出版社

- 社 2004 年版。
177. 斯图亚特·考夫曼:《宇宙为家》,李绍明、徐彬译,湖南科技出版社 2003 年版。
 178. 汪应洛:《系统工程及其应用》,科学出版社 1990 年版。
 179. 许国志主编:《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社 2000 年版。
 180. 雅克·莫诺:《偶然性和必然性》,上海外国自然科学哲学著作编译组译,上海人民出版社 1977 年版。
 181. 颜泽贤:《耗散结构与系统演化》,福建人民出版社 1987 年版。
 182. 颜泽贤:《现代系统理论》,三联书店(香港)有限公司 1993 版。
 183. 颜泽贤:《复杂性探索与控制论发展》,载《自然辩证法研究》,2005—6。
 184. 颜泽贤、范冬萍:《复杂性探索:理论与价值》,载《新世纪新思维》,中国财政经济出版社 2004 年版。
 185. 伊·普里戈金、伊·斯唐热:《从混沌到有序》,曾庆宏、沈小峰译,上海译文出版社 1987 年版。
 186. 约翰·霍兰:《涌现——从混沌到有序》,陈禹等译,上海科学技术出版社 2001 年版。
 187. 约翰·卡斯蒂:《虚实世界》,王千祥等译,上海科技教育出版社 1998 年版。
 188. 约翰·罗尔斯:《正义论》,中国社会科学出版社 1998 年版。
 189. 约翰·霍兰:《隐秩序——适应性造就复杂性》,周晓牧等译,上海科技教育出版社 2000 年版。
 190. 张华夏:《实在与过程》,广东人民出版社 1997 年版。
 191. 张华夏、叶侨健:《现代自然哲学与科学哲学》,中山大学出版社 1996 年版。
 192. 张志林、张华夏主编:《系统观念与哲学探索》,中山大学出版社 2003 年版。
 193. 周辅成:《西方伦理学名著选辑》上卷,商务印书馆 1996 年版。
 194. 朱志昌:《当代西方系统运动》,载《系统科学与工程研究》,上海科技教育出版社 2000 年版。
 195. 邹珊刚等编:《系统科学》,上海人民出版社 1987 年版。

三、Java 文献

1. 第 6 章推荐 Java 文献

Exploring Emergence <http://ilk.media.mit.edu/projects/emergence/>

John Conway's Game of Life <http://www.bitstorm.org/gameoflife/>

Life in Java <http://www.radicaleye.com/lifepage/java.html>

Introduction to Cellular Automata <http://www.rennard.org/alife/english/acintrogb01.html>

Paul Callahan : What is the Game of Life?

<http://www.math.com/students/wonders/life/life.html>

2. 第7章推荐Java文献

叠代和吸引子 <http://www.mcasco.com/oaad.html>

<http://www.mcasco.com/oaad3.html>

<http://www.mcasco.com/oaar.html>

叠代和分叉 <http://www.mcasco.com/oapcmd3.html>

混沌的有序之窗 <http://www.mcasco.com/oaawoo.html>

混沌的普遍性 <http://www.mcasco.com/oatfd.html>

<http://www.mcasco.com/oaspcml.html>

<http://www.mcasco.com/oasfc.html>

<http://www.mcasco.com/oagpcml.html>

<http://www.mcasco.com/oaunb.html>

叠代和蒙德布罗集 <http://www.mcasco.com/oiams.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv1.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv2.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv3.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv4.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv5.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv6.html>

<http://www.mcasco.com/oamsv10.html>

朱莉亚集 <http://www.mcasco.com/oajs1.html>

<http://www.mcasco.com/oajs2.html>

<http://www.mcasco.com/oajs3.html>

<http://www.mcasco.com/oajs4.html>

<http://www.mcasco.com/oajs5.html>

<http://www.mcasco.com/oajs5z1.html>

<http://www.mcasco.com/oajs5z2.html>

动力系统与混沌吸引子

<http://www.mcasco.com/oappt.html>
<http://www.mcasco.com/oappvt.html>
<http://www.mcasco.com/oappvtd.html>
<http://www.mcasco.com/oap2dps.html>
<http://www.mcasco.com/oap2dpsd.html>
<http://www.mcasco.com/oap3dpsp.html>
<http://www.mcasco.com/oap3dps.html>
<http://www.mcasco.com/oap3dpsd.html>
<http://www.mcasco.com/oappsep.html>
<http://www.mcasco.com/oappsep1.html>
<http://www.mcasco.com/oappsomc.html>
<http://www.mcasco.com/oapsomed.html>
<http://www.mcasco.com/oapsosc.html>
<http://www.mcasco.com/oapsoscd.html>

达芬振荡器实验

<http://www.mcasco.com/oadm0v0.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v1.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v2.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v3.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v1a.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v2a.html>
<http://www.mcasco.com/oadm0v3.html>

3. 第9章推荐Java文献

化学钟: The Belousov-Zhabotinsky Reaction - <http://online.redwoods.cc.ca.us/instruct/darnold/deproj/Sp98/Gabe/>

重复博弈:

Prisoner's Dilemma <http://www.sussex.ac.uk/space-science/prisoner.html>

虚拟蚂蚁 (Vants) <http://www.sussex.ac.uk/space-science/socail.html>

or [http://www.sussex.ac.uk/space-science--Nature--Social Interactions](http://www.sussex.ac.uk/space-science--Nature--Social%20Interactions)

Langton's ant : a cellular automaton <http://users.libero.it/acnard/ant.html>

Langton's ant Applet <http://www.tiac.net/~sw/LangtonsAnt/LangtonsAnt.html>

群 伴 (Boids) <http://www.red3d.com/cwr/boids/applet/>

4. 第 10 章推荐 Java 文献

Marek Obitko Introduction to Genetic Algorithms VI. GA Example

<http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/index.html>

http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/example_f.html

The Mind Project: A computer model of the neuron

<http://www.mind.ilstu.edu/curriculum2/perception/mpneuron1.html>

索引

- 艾什比(Ashby, W. Ross) 13, 38, 41, 56, 70, 86, 129, 136, 137, 178, 209, 234, 297, 310, 360, 412, 427, 430, 462, 474
- 巴纳德(Barnard, Chester) 410
- 包尔丁(Boulding, Kenneth D.) 6, 7, 13, 14, 36
- 鲍威斯(Powers, William T.) 18, 56, 129, 236, 292, 293, 308, 309, 312, 313, 314, 316, 318, 319, 320, 321, 381, 471
- 贝尔(Beer, Stafford) 19, 33, 39, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 426, 428, 430
- 贝尔多样性工程(Beer Variety Engineering) 427, 429
- 贝纳德元胞(Benard cells) 15, 335, 336, 346, 461
- 贝塔朗菲(Bertalanffy, L. V.) 4, 6, 7, 8, 13, 16, 20, 23, 27, 29, 31, 34, 35, 36, 55, 62, 71, 74, 100, 242, 459, 467, 474
- 比特(Bit) 121, 122, 123, 213, 215, 216, 301
- 必要的层级定律(The Law of Requisite Hierarchy) 119, 301
- 必要的多样性(变异度) 定律(The Law of Requisite Variety) 427
- 波普(Popper, Karl) 106, 139, 142, 143, 144, 158, 380, 391, 438
- 不可预测性(Unpredictability) 17, 26, 101, 102, 281, 286, 288, 364, 431, 462
- 布莱曼(Bremermann, Hans) 215, 216, 217, 222, 235
- 布莱曼极限(Bremermann's Limit) 216, 217, 301, 323, 462
- BZ反应(Belousov-Zhabotinsky Chemical Reaction) 337, 338, 342, 346, 355, 356, 461
- 层叠(Cascade) 17, 250, 251, 254, 255, 257, 462
- 超循环(Hypercycle) 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 55, 102, 112, 141, 142, 149, 156, 292, 341, 372, 473
- 传递水桶算法(Bucket brigade algorithm) 386, 387, 388, 389, 396, 388
- 粗粒化(Coarse graining) 72, 209, 210, 461
- 达尔文主义(Darwinism) 139, 141, 142, 370
- 达芬振荡器(Duffing's oscillator) 278,

- 279, 280, 281, 478
- 倒数第二层分叉增长规律 (Branching Growth of the Penultimate Level of Control) 299, 300, 304, 305, 306, 307
- 道金斯 (Dawkins, Richard) 139, 144, 163, 371, 397, 475
- 递归 (Recursion) 39, 76, 245, 425, 426
- 贝尔递归原理 (Beer Recursive principle) 424, 425
- 叠代 (Iterate/Iterative) 17, 28, 87, 221, 228, 229, 231, 242, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 257, 263, 265, 268, 269, 270, 273, 281, 345, 393, 399, 425, 459, 461, 462, 477
- 动力系统 (Dynamical System) 14, 17, 28, 107, 240, 249, 273, 274, 275, 278, 281, 282, 284, 441, 464, 478
- 动力学 (Dynamics/Dynamical) 14, 17, 25, 46, 47, 48, 51, 62, 75, 97, 102, 107, 199, 218, 222, 223, 231, 242, 250, 278, 294, 304, 334, 341, 342, 345, 348, 351, 360, 372, 456, 462, 475
- 对初始条件的敏感性 (sensitive to initial conditions) 102, 282, 283, 284, 288, 401, 431
- 多项式时间算法 (Exponential time algorithm) 213, 214
- 多样性 (Variety)
- 活系统的多样性 (Variety of Viable System) 428
- 管理系统的多样性 (Variety of Management System) 428, 429, 430
- 剩余多样性 (Residual variety) 429
- 必要的多样性 (Requisite) 38, 155, 234, 237, 371, 394, 426, 427, 430
- 非对称性 (Nonsymmetry) 17, 203, 206, 207
- 非线性 (Nonlinear) 11, 17, 18, 41, 43, 49, 53, 61, 86, 102, 149, 202, 203, 206, 207, 224, 240, 242, 268, 273, 274, 337, 341, 343, 345, 346, 347, 348, 352, 355, 357, 431, 465, 475
- 非周期的 (Aperiodic) 223
- 费根鲍姆 (Feigenbaum, M. J.) 257, 273, 462
- 费根鲍姆常数 (Feigenbaum Constant) 257, 272
- 分叉 (Bifurcation, Diverge) 16, 17, 45, 55, 149, 168, 232, 246, 248, 250, 251, 253, 254, 255, 257, 282, 305, 322, 337, 341, 349, 350, 351, 352, 401, 462, 477
- 分类器 (Classifier) 372, 383, 385, 386, 387, 389, 390, 395, 399, 400, 430
- 分形 (Fractal) 14, 17, 45, 47, 49, 50, 51, 61, 115, 255, 258, 263, 265, 266, 267, 268, 272, 285, 425, 475
- 分形几何学 (Fractal geometry) 17, 28, 49, 61, 260
- 冯·诺伊曼 (Von Neumann, John) 218, 219, 226, 227, 229
- 服务原则 (The principle of Service) 424

- 福罗特 (Flood, Robert L.) 4, 16, 25, 201, 415
- 负反馈 (Negative Feedback) 133, 132, 168, 308, 348, 351, 357, 405, 419
- 负熵 (Negative Entropy) 42, 128, 149, 155, 190, 342
- 复杂适应系统 (Complex adaptive System) 9, 18, 47, 52, 53, 54, 56, 97, 148, 156, 160, 171, 199, 291, 299, 308, 372, 375, 376, 379, 380, 392, 397, 398, 402, 422, 430, 433, 462, 464
- 复杂系统理论 (Complex System Theory) 16, 48, 75, 108, 240, 405, 459
- 复杂系统总论 (General Complex systems Theory) 14, 15, 17
- 复杂系统分论 (Special Complex systems Theory) 17, 291
- 描述复杂性 (descriptive Complexity) 209, 210, 211
- 算法复杂性 (Algorithmic Complexity) 210, 211, 213, 214
- 复杂性爆炸 (Explosion of complexity) 250
- 盖尔曼 (Cell-Mann, M.) 53, 56, 72, 210, 377, 378, 379, 380, 462, 473
- 感知控制论 (The Control Theory of Perception) 57, 236, 307, 309, 312, 316, 471
- 高斯函数 (Gaussian function) 242, 243, 257, 273
- 格式塔 (Gestalts) 29
- 个体为基础的模型 (Individual based models) 343
- 功能分析 (Functional analysis) 16, 151, 165, 166, 167, 174
- 功能主义 (Functionalism) 82, 164, 165, 166, 167, 168, 171, 172, 173, 174, 175, 399, 436, 452, 453
- 构型 (Configuration) 75, 76, 101, 145, 147, 148, 218, 224, 228, 229, 231, 232, 310, 312, 314, 315, 316, 317, 320, 344, 346, 348, 366
- 固定点 (Fixed Point) 92, 93, 94, 226, 241, 248, 273
- 广义进化论 (General evolutionism) 16, 116, 138, 139, 156, 185, 188
- 规则集 (Rules Set) 226, 240, 384, 387, 402
- 规整的几何形状 (Regular geometric shapes) 259
- 哈肯 (Haken, Hermann) 14, 18, 42, 43, 45, 46, 48, 54, 139, 141, 156, 291, 335, 341, 352, 353, 356, 462, 474
- 海里津 (Heylighen, F.) 56, 77, 105, 291, 292, 293, 307, 332, 341, 344, 372, 460
- 耗散结构 (Dissipative structure) 18, 41, 42, 44, 45, 47, 48, 55, 155, 157, 299, 308, 331, 341, 346, 350, 355, 461
- 黑箱 (Black Box) 16, 38, 63, 82, 151, 165, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 216, 245
- 霍兰 (Holland, John) 53, 56, 57, 341, 384, 386, 387, 389, 399

- 红皇后原理 (Red Queen Principle) 237
- 蝴蝶效应 (Butterfly Effect) 17, 48, 245, 282, 337, 462
- 滑翔机 (Glider) 101, 228, 229, 230, 401
- 滑翔机枪 (Glider Gun) 101, 228, 229, 230, 403
- 化学波 (Chemical Wave) 339, 347
- 化学钟 (Chemical Clock) 339, 342, 343, 347, 478
- 还原论 (Reductionism) 11, 12, 16, 22, 29, 30, 58, 60, 99, 103, 104, 112, 113, 157, 158, 160, 162, 163, 164, 175, 332, 364, 397, 463
- 混沌边缘 (Edge of Chaos) 53, 54, 56, 207, 224, 227, 241, 431, 432, 461
- 基准信号 (Reference signal) 309, 311, 312, 313, 317, 376
- 激光 (Lasers) 15, 42, 45, 139, 141, 142, 156, 335, 353, 354, 355, 356
- 极限环 (Limit Cycle) 92, 93, 94, 222, 224, 226, 284, 340, 347
- 计算机模拟 (Simulation of Computer) 16, 18, 181, 193, 195, 331, 362, 381, 390
- 交叉算子 (crossover operator) 394
- 杰克逊 (Michael C. Jackson,) 19, 137, 185, 415, 437, 452, 455, 456, 458, 475
- 坎贝尔 (Campbell, Donald) 105, 106, 139, 145, 360
- 康托集 (Cantor Set) 261, 262, 263, 265, 266, 268, 425
- 康威 (Conway, John) 219, 226, 227, 228, 229, 346
- 康威生命游戏 (Conway's Game of Life) 226, 228, 346
- 考夫曼 (Kauffman, Stuart) 56, 146, 148, 149, 233, 291, 341, 476
- 科层模型 (Bureaucracy model) 408
- 科赫 (Von Koch, Helge) 263, 265, 266, 268
- 科赫曲线 (Koch Curve) 263, 264, 425
- 克勒尔 (Klir, J. H.) 4, 6, 8, 12, 25, 61, 297
- 空间复杂性 (Space Complexity) 213
- 控制 (Control)
- 反射的控制 (Control of Reflexes) 18, 302
 - 分布式的控制 (Distributed Control) 357, 359
 - 感知控制 (Control of Perception) 307, 309, 311
 - 集中化控制 (Centralized Control) 357
 - 联想的控制 (Control of Association) 18, 302, 304
 - 思想的控制 (Control of Thinking) 18, 304, 319
 - 细胞兴奋的控制 (Control of Cell Irritation) 18, 301
 - 行动的控制 (Control of Actions) 300

- 控制参量 (Control Parameter) 250, 350, 351
- 控制系统 (Control System)
 多层次控制系统 (Multi Levels Control System) 18, 291, 307
- 跨学科研究 (Research of Cross-discipline) 31, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 291, 392, 410, 463, 465
- 跨学科研究方法 (The Method of Cross discipline) 151, 156, 162
- 跨学科定义 (definition of Cross discipline) 158, 159, 160, 163
- 朗顿 (Langton, Chris) 225, 226, 363, 364, 365, 366
- 朗顿的 λ 参量 (Langton's Lambda Parameter) 225, 462
- 离散的动力学 (Discrete dynamics) 218
- 鲁棒性 (Robustness) 52, 348, 356, 360, 372
- 罗森 (Rosen, R.) 5, 6, 116, 117, 154, 156, 180, 299, 306, 412, 464, 473
- 逻辑斯蒂方程 (Logistic equation) 242, 246
- 洛伦兹 (Edward Lorenz) 47, 139, 282, 283
- 盲目的变异与选择的保存原理 (The Principle of blind variation and selection retention) 145
- 蒙德布罗 (Mandelbrot, Benoit) 49, 260, 261, 266, 269, 270, 271
- 蒙德布罗集 (Mandelbrot Set) 268, 269, 270, 271, 272, 273, 425, 477
- 目的定向性 (Goal oriented) 362
- 目的性功能 (Teleologic function) 165
- 内稳态 (Homeostasis) 129, 203, 294
- 脑妖 (Little man in the head) 359, 460
- 爬山运动 (Hill climb) 373
- 帕森斯 (Parsons, Talcott) 166, 167, 168, 169, 170, 171, 410, 411
- 皮亚诺曲线 (Peano Curve) 266, 268, 286
- 普适性 (Universality) 11, 35, 48, 257, 402
- 普利高津 (Prigogine, I.) 12, 14, 18, 42, 45, 46, 55, 56, 156, 334, 338, 341, 343, 346, 351, 462
- 奇异吸引子 (Strange Attractor) 17, 94, 223, 249, 279, 431
- 前馈 (Feedforward) 131, 132, 133, 134, 135
- 桥接原理 (Bridge Principle) 103, 104, 159, 164
- 切克兰德 (Checkland, Peter) 14, 16, 20, 38, 40, 97, 448, 449, 451, 452, 465
- 权变的观点 (Contingency approach) 411
- 群伴 (Boid 或 flockmates) 368, 369
- 染色体串 (Chromosomes) 392
- 人工生命 (Artificial Life) 53, 462

- 人工智能 (Artificial Intelligence) 12, 25, 139, 165, 175, 361
- 熵 (Entropy) 39, 55, 116, 124, 125, 126, 127, 128, 136, 155, 333, 343, 428
- 上索 (Updution) 16, 30, 151, 157, 158, 162, 163, 164, 165, 167
- 申农 (Shannon, C. E.) 39, 41, 124, 128, 137, 310, 333
- 实数集 (Real number set) 263
- 适合度 (degree of fitness) 373, 385
- 适应函数 (fitness function) 392
- 适应性景观 (Adaptive landscape 或 Fitness landscape) 16, 18, 56, 374, 375, 431, 435
- 适应性受约束生成过程 (Adaptive Constrained Generating Procedures) 398, 402
- 适应性自稳定 (Adaptive Self Stable), 94, 95, 96, 138, 308, 375, 411
- 适者生存 (Survival of the fittest) 138, 139, 140, 141, 147, 232, 376
- 收敛 (Convergence) 94, 255, 270, 273
- 泰罗 (Taylor, F.) 183, 407
- 探测器 (Detector) 383, 384, 387
- 通用计算 (Universal computation) 219, 228
- 通用计算机 (Universal computer) 101, 224, 227, 229, 401
- 同构 (Isomorphism) 4, 6, 14, 16, 32, 36, 59, 180, 179, 195, 210, 314, 416, 459, 463
- 同态 (Homomorphism) 16, 179, 180, 191, 192, 193, 195, 416, 463
- 同态映像 (Homomorphic image) 191, 192, 193, 210
- 突变 (Mutation) 16, 41, 45, 107, 138, 141, 143, 145, 146, 149, 232, 239, 241, 250, 374, 375, 377, 380, 391, 394, 395, 396, 397, 402
- 突变算子 (Mutation operator) 393, 395
- 突现 (Emergence) 12, 16, 18, 31, 53, 58, 60, 63, 64, 71, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 104, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 118, 138, 150, 158, 188, 203, 218, 236, 296, 297, 300, 301, 302, 304, 306, 312, 341, 344, 362, 364, 366, 371, 397, 399, 400, 402, 401, 431, 432, 433, 434, 455, 462, 463
- 突现进化论 (Emergence evolutionism) 98, 99
- 图灵 (Turing, Alan) 172, 211
- 图灵机 (Turing Machine) 17, 173, 174, 211, 212, 213, 214
- 图琴 (Turchin, V.) 18, 56, 236, 291, 293, 294, 297, 300, 301, 303, 305, 306, 307, 321, 322, 418, 460
- 维纳 (Wiener, Norbert) 16, 37, 38, 120, 124, 127, 128, 129, 154, 155, 156, 177, 180, 292, 307, 414, 473
- 文化基因 (Meme) 144, 148, 185, 371
- 稳定域 (Stable region) 92, 93, 94
- 沃尔弗拉姆 (Wolfram, Stephen) 219, 220, 222, 223, 224, 225, 226

- 无规则性(irregulation) 17,280
- 西蒙(Simon, Herbert A.) 33, 114, 115, 116, 117, 118, 138, 139, 207, 235, 299, 306, 410, 475
- 吸引子(Attractor)
- 固定点吸引子(Attractor of Fixed Point) 247, 248
 - 混沌吸引子(Chaos Attractor) 249, 253, 273, 274, 278, 279, 280, 282, 284, 285, 286, 287, 478
 - 奇异吸引子(Strange Attractor) 17, 94, 223, 249, 279, 431
 - 吸引子的分裂(splitting) 253
 - 周期吸引子(Periodic Attractor) 253, 279, 284
- 系统(System)
- 操作系统(Operational System) 418, 419, 424, 425, 426, 427, 429, 430
 - 活系统(Viable Systems) 19, 195, 406, 410, 412, 414, 415, 417, 419, 421, 423, 425, 426, 427, 428, 430, 456
 - 开发系统(Development System) 419, 422, 423
 - 协调系统(Regulation System) 419
 - 优化控制系统(Optimization System) 419, 421
 - 政策制定系统(Policy making system) 423
- 系统方法论(Systems Methodology) 8, 9, 171, 437, 446, 451, 452, 455, 457, 458, 463
- 系统概念(System Concepts) 4, 8, 16, 24, 27, 33, 36, 38, 58, 69, 97, 190, 319, 398, 418, 449, 450, 451, 460
- 系统工程(Systems Engineering) 13, 19, 33, 55, 58, 80, 82, 292, 405, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 445, 446, 450, 452, 455, 464, 475, 476
- 系统进路(Systems Approach) 64
- 系统科学方法论(Methodology of Systems Science) 16, 17, 64, 172, 463, 458
- 系统思想(Systems Thinking) 3, 8, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 30, 32, 33, 34, 35, 40, 58, 64, 96, 97, 190, 203, 231, 325, 405, 406, 414, 436, 449, 452, 453, 456, 465
- 系统运动(movement) 3, 8, 14, 15, 20, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 40, 47, 63, 69, 97, 153, 180, 407
- 系统哲学(Systems Philosophy) 7, 25, 46, 96, 115, 57, 351
- 相互作用(Interaction)
- 非线性的相互作用(Nonlinear Interaction) 345, 346
 - 局域性相互作用(Local Interaction) 334, 344
 - 全局性的相互作用(Overall Interaction) 344
- 相控图(Phase-control map) 17, 250, 251, 252, 254
- 消息系列(Message List) 384

- 效应器 (Effector) 134, 299, 300, 301, 302, 311, 317, 319, 320, 321, 361, 382, 383, 384
- 协同进化 (Coevolution) 113, 431
- 协同学 (Synergetics) 40, 42, 45, 46, 47, 48, 55, 141, 156, 157, 308, 352, 474
- 心智哲学 (Philosophy of mind) 165, 172
- 新达尔文主义 (Neo - Darwinism) 156, 389, 397
- 新颖性 (Novelty) 101, 399
- 行动主体 (Agents) 18, 185, 344, 361, 362, 368, 370, 373, 377, 378, 380, 381, 382, 388, 399, 401, 402, 461
- 自主行动主体 (Autonomous Agents) 361, 362, 399
- 行为规则 (Behavior Rules) 17, 227, 228, 229, 363, 364, 367, 370, 401, 461
- 虚拟蚂蚁 (Virtual ants 或 Vants) 363, 366
- 虚数 (Imaginary Number) 193, 268, 269
- 序 (Order)
- 通过噪声而有序 (order from noise) 41, 374
- 通过涨落而有序 (order through fluctuation) 41, 42, 156, 370
- 有序度 (degree of orderliness) 41, 43, 149, 333
- 自由序 (order for free) 362
- 序参量 (Order Parameter) 43, 354, 355, 356, 462
- 序列 (Sequence) 18, 43, 88, 89, 92, 106, 110, 112, 113, 121, 122, 124, 140, 161, 173, 235, 240, 257, 270, 307, 312, 315, 317, 318, 321, 368, 375, 386, 400
- 一般系统论 (General Systems Theory) 4, 6, 7, 12, 15, 16, 20, 21, 23, 27, 29, 31, 35, 36, 37, 39, 40, 71, 97, 100, 153, 180, 187, 199, 459, 464, 467, 474
- 遗传算法 (Genetic algorithms 或 GA) 18, 52, 241, 370, 376, 390, 392, 393, 394, 395, 398, 400, 402
- 因果关系 (Causation)
- 环形因果关系 (Cycle Causation) 74, 291
- 上向因果关系 (upward causation) 103, 104, 106, 112, 158, 356, 463
- 下向因果关系 (Downward causation) 105, 106, 107, 108, 111, 112, 356, 460, 463
- 隐喻 (Metaphor) 16, 47, 60, 64, 105, 144, 151, 157, 166, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 191, 195, 237, 392, 416, 463
- 影子系统 (Shadow System) 434, 435
- 有序之窗 (window of order) 17, 253, 254
- 元胞自动机 (Cellular Automata) 17, 28, 61, 101, 218, 219, 221, 224, 226, 229, 230, 241, 346, 363, 364, 389, 401, 461, 462
- 一维 (one dimensional) 元胞自动机 12, 219, 250, 263, 265, 267, 314, 464

- 元变换 (Metatransform) 89, 90
- 元系统 (Metasystem) 295, 297, 300, 305, 318, 417, 418, 419, 421, 424, 427, 429, 430
- 元系统跃迁 (Metasystem transitions) 18, 57, 89, 236, 292, 293, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 303, 304, 306, 307, 322, 359
- 元系统跃迁的阶梯 (stairway of Metasystem transitions) 298, 304
- 运筹学 (Operational Research) 27, 31, 32, 40, 55, 405, 414, 436, 437, 445, 455, 464
- 涨落 (fluctuation) 18, 41, 42, 45, 55, 107, 149, 193, 284, 341, 349, 350, 351, 354, 374, 461
- 整体论 (Holism) 11, 12, 16, 22, 23, 29, 30, 32, 31, 98, 99, 100, 112, 113, 332, 397, 463, 469
- 正反馈 (Positive Feedback) 132, 233, 237, 306, 307, 340, 347, 348, 351, 354, 357
- 执行器 (executor) 311, 322
- 指数式时间算法 (Polynomial time algorithms) 214
- 周期的结构 (Periodic structures) 222
- 朱莉亚集 (Julia Set) 268, 273, 477
- 状态变化 (State Change) 16, 45, 74, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 121, 125, 189, 228, 249, 274, 275, 276, 278, 280, 400
- 状态变换 (State transform) 87, 88, 89, 95, 173, 315
- 状态轨线 (State trajectory) 85, 277, 280, 287, 286
- 状态空间 (State Space) 74, 83, 85, 86, 92, 107, 109, 249, 281, 373, 431
- 自我相关 (self-reference) 423
- 自相似 (self-similarity) 17, 50, 51, 255, 260, 263, 265, 267, 272, 431
- 自组织 (Self-Organization) 9, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 30, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 56, 57, 63, 89, 97, 100, 110, 111, 117, 118, 129, 138, 148, 149, 156, 160, 168, 190, 191, 203, 291, 297, 299, 308, 322, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 341, 342, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 310, 351, 352, 353, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 366, 367, 368, 369, 372, 399, 411, 424, 426, 429, 430, 434, 460, 461, 462, 464
- 自组织临界性 (Self Organized Criticality 或 SOC) 51, 52
- 组织与管理 (Organization and Management) 18, 19, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 414, 419, 431, 432